

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS  
Titulación: **INGENIERO GEÓLOGO**

PROYECTO FINAL DE CARRERA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

MODELIZACIÓN ESTOCÁSTICA DE LA PRESIÓN  
DE LOS NITRATOS EN LA CUENCA DEL RÍO  
LLOBREGAT

JAVIER MARTÍN ARIAS

JULIO DE 2012

**TITULACIÓN: INGENIERO GEÓLOGO**

Autorizo la presentación del proyecto

*Modelización estocástica de la presión de los nitratos en la cuenca del río Llobregat*

Realizado por

**Javier Martín Arias**

Dirigido por

**Francisco Javier Elorza Tenreiro**

Firmado: **Prof. Francisco Javier Elorza Tenreiro**

Fecha:.....

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera dar las gracias a Francisco Javier Elorza Tenreiro por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto con él y haber confiado en mí. También hacer una mención muy especial a María Sánchez Canales por su gran apoyo y ayuda en toda la realización del mismo, así como a Jose Luís Villa, Víctor García y a Maribel Guerrero.

Agradecer al Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) su amabilidad y gentileza en cuanto a los datos proporcionados, cuya importancia ha sido vital.

Por último agradecer a mi familia y amigos el gran apoyo que me han proporcionado todos estos años, así como a mis compañeros de la carrera que, sin ellos, no hubiese sido lo mismo.

## **ÍNDICE**

<b><u>RESUMEN</u></b> .....	<b>VI</b>
<b><u>ABSTRACT</u></b> .....	<b>VI</b>

### **DOCUMENTO 1: MEMORIA**

<b>1. OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO</b> .....	<b>2</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2 USOS ANTROPOLÓGICOS DEL SUELO</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3 DEMOGRAFÍA DE LA CUENCA DEL LLOBREGAT</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4 DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y DE ESCORRENTÍA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.5 DATOS DE CAUDALES</b> .....	<b>8</b>
<b>2.6 CICLO DEL NITRÓGENO</b> .....	<b>9</b>
<b>2.6.1 Ciclo natural del nitrógeno</b> .....	<b>9</b>
<b>2.6.2 Alteración del ciclo del nitrógeno</b> .....	<b>11</b>
<b>2.7 PROCESOS QUE AUMENTAN EL NIVEL DE NITRÓGENO</b> .....	<b>13</b>
<b>2.7.1 Deposición atmosférica</b> .....	<b>13</b>
<b>2.7.2 Fertilizantes y abonos</b> .....	<b>14</b>
<b>2.7.3 Plantas de tratamiento de aguas residuales</b> .....	<b>16</b>
<b>2.7.4 Descargas industriales</b> .....	<b>17</b>
<b>2.8 PROCESOS QUE DISMINUYEN EL NIVEL DE NITRÓGENO</b> ....	<b>18</b>
<b>2.8.1 Desnitrificación</b> .....	<b>19</b>
<b>2.8.2 Volatilización</b> .....	<b>19</b>
<b>2.8.3 Retención del nitrógeno en el suelo</b> .....	<b>20</b>
<b>2.8.4 Asimilación del nitrógeno por las cosechas y la vegetación</b> .....	<b>20</b>

2.8.5	Sedimentación neta.....	20
2.9	DIRECTIVA MARCO DEL AGUA Y LEGISLACIÓN EUROPEA SOBRE LOS NITRATOS .....	21
3.	METODOLOGÍA.....	23
3.1	EL MODELO ESTOCÁSTICO.....	23
3.2	PARÁMETROS DEL MODELO.....	24
4.	CÁLCULOS DEL PROYECTO.....	26
4.1	ÁREA ESTUDIADA.....	26
4.2	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	28
4.2.1	Calibración por subcuencas separadas.....	29
4.2.2	Calibración: cuenca única.....	30
4.2.3	Calibración y validación con las subcuencas periféricas.....	31
4.2.4	Coefficiente de Nash-Sutcliffe.....	34
4.3	ANÁLISIS DE LA PRESIÓN DE NITRÓGENO.....	34
4.3.1	Fuentes difusas.....	35
4.3.2	Distribución de las fuentes.....	38
4.4	ESCENARIOS DE ENTRADA DE NITRÓGENO .....	39
4.5	LOS NITRATOS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	42
5.	CONCLUSIONES.....	44
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	47

## **DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO**

1.	COSTES DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	50
1.1	COSTE DE PERSONAL.....	50
1.2	COSTE DE RECURSOS MATERIALES.....	51

1.2.1	Material informático.....	51
1.2.2	Gastos varios.....	51
1.3	COSTE GLOBAL.....	52

# **FIGURAS**

## **DOCUMENTO 1: MEMORIA**

Figura 1: Cuenca del río Llobregat dentro de Cataluña.....	3
Figura 2: Evolución de la precipitación anual en milímetros sobre la cuenca del río Llobregat.....	7
Figura 3: Situación de las 18 estaciones de aforo dentro de la cuenca del Llobregat, que se haya sombreada de color rojo.....	8
Figura 4: Evolución del caudal anual en m <sup>3</sup> /s en la cuenca del Llobregat.....	8
Figura 5: Ciclo del nitrógeno.....	10
Figura 6: Evolución de la fijación anual de nitrógeno.....	11
Figura 7: Mapa resultado del modelo EMEP sobre deposición atmosférica.....	14
Figura 8: Evolución de la superficie de suelo cultivado.....	15
Figura 9: Uso de fertilizantes nitrogenados en la cuenca del Llobregat.....	15
Figura 10: Situación de las 45 EDAR sobre la la cuenca del río Llobregat.....	17
Figura 11: Subcuencas realizadas en la cuenca del río Llobregat.....	26
Figura 12: Calibración del modelo de las subcuencas del Llobregat.....	29
Figura 13: Gráfica de la calibración del modelo para la cuenca única.....	30
Figura 14: Gráfica de la calibración con las cinco subcuencas seleccionadas.....	32
Figura 15: Gráfica de la validación con las cinco subcuencas seleccionadas.....	32
Figura 16: Gráfica de la relación entre la precipitación y los nitratos medidos.....	33
Figura 17: Gráfica de la relación entre la precipitación y los nitratos calculados por el modelo.....	33
Figura 18: Áreas urbanas de la cuenca del Llobregat.....	35
Figura 19: Emisiones difusas calculadas para el periodo 2000 al 2006.....	36

## **TABLAS**

### **DOCUMENTO 1: MEMORIA**

Tabla 1: Datos demográficos totales y de la cuenca del Llobregat.....	6
Tabla 2: Descargas industriales en la cuenca del Llobregat.....	18
Tabla 3: Correlaciones entre la precipitación y la longitud de río con respecto a la cantidad de nitratos medidos.....	25
Tabla 4: Datos medios de las 9 subcuencas durante el periodo 2000 al 2009.....	27
Tabla 5: Emisiones difusas de nitrógeno en toneladas calculadas por el modelo.....	36
Tabla 6: Distribución en porcentaje de los distintos tipos de fuente.....	38
Tabla 7: Reparto en porcentaje de la presión de los nitratos.....	39
Tabla 8: Resultados en porcentaje del caso 1.....	40
Tabla 9: Resultados en porcentaje del caso 2.....	41

### **DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO**

Tabla 10: Coste de personal.....	51
Tabla 11: Costes de los recursos materiales.....	52
Tabla 12: Coste total del proyecto.....	53



## **RESUMEN**

Este proyecto tiene como objetivo caracterizar la presión de los nitratos dentro de la cuenca del río Llobregat, España, entre los años 2000 y 2009. Con ello se consigue una herramienta que permite un análisis de las distintas fuentes de contaminación, una gestión y planificación de medidas correctoras y el cálculo de la presión de nitratos en un futuro, de acuerdo con el artículo 5 de la Directiva Marco del Agua y para la aplicación de la Directiva Europea sobre Nitratos. Para determinar dichas presiones, se ha usado un modelo estocástico que requiere pocos datos, siendo éstos de fácil accesibilidad: las precipitaciones y las longitudes de los ríos. Dividida la cuenca del Llobregat en nueve subcuencas, sólo se ha podido calcular la presión de los nitratos para cinco de ellas. Los resultados han demostrado que la mayor parte de la presión de los nitratos se debe a las fuentes difusas, siendo este tipo de fuente la que determina los cambios en la presión de los nitratos. En cuanto a las fuentes aisladas, se tienen que tener en cuenta debido a que su presencia en la presión de los nitratos es significativa en varias subcuencas, alrededor del 20%, siéndolo aún más en las cuencas que no se han podido estudiar.

## **ABSTRACT**

The objective of this project is to characterize the nitrates pressure in the Llobregat river basin, in Spain, between 2000 and 2009. This is a tool that allows an analysis of different sources of pollution, the management and corrective action planning and predicting the nitrates pressure in the future pursuant to the Article 5 of the Water framework Directive, and for the implementation of the Nitrate Directive. To determine these pressures, we have used a stochastic model that requires small amounts of data, which can be easily obtained: precipitations and river lengths. Llobregat river basin has been divided into nine sub-basins; however our model works of five of them. The results have shown that most of the nitrates pressure is due to diffuse sources, which determine the pressure changes. The point sources must be taken into account because their presence in the nitrates pressure is significant in several sub-basins, around 20%, so even more in those our model fails to reproduce.

MODELIZACIÓN ESTOCÁSTICA DE LA PRESIÓN DE  
LOS NITRATOS EN LA CUENCA DEL RÍO  
LLOBREGAT

DOCUMENTO 1: MEMORIA

## 1 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO

En este proyecto final de carrera se va a aplicar una herramienta de modelado estocástico, para evaluar el impacto de la presión de nitrógeno en el estado de la calidad de las aguas superficiales de la cuenca hidrológica del río Llobregat. El modelo puede ser utilizado para el análisis de las presiones e impactos de las distintas fuentes de contaminación de nitrógeno, de conformidad con el artículo 5 de la Directiva marco del agua y para la aplicación de la Directiva Europea sobre Nitratos.

El enfoque del modelo utilizado en este proyecto consiste en un modelo simplificado conceptualmente, que distingue entre dos diferentes vías en la transferencia de nitrógeno desde sus diversos orígenes al río: el nitrógeno que pasa a través de los suelos y rocas antes de llegar al río (fuentes difusas), y el nitrógeno echado directamente sobre el cauce del los ríos (fuentes aisladas).

El objetivo del proyecto es el desarrollo y aplicación de un enfoque de modelado eficiente a escala de cuencas medianas, como es la del río Llobregat, que permite el análisis de la presión de nitratos en la calidad del agua superficial a partir de los datos más generalmente disponibles.

En particular, el modelo estocástico tiene como objetivos:

- Identificar las zonas sujetas a presiones de contaminación más altas.
- Cuantificar la importancia relativa de las diferentes fuentes de nitrógeno (aisladas y difusas) en la calidad del agua.
- Estimar el impacto de estrategias alternativas de gestión del agua.

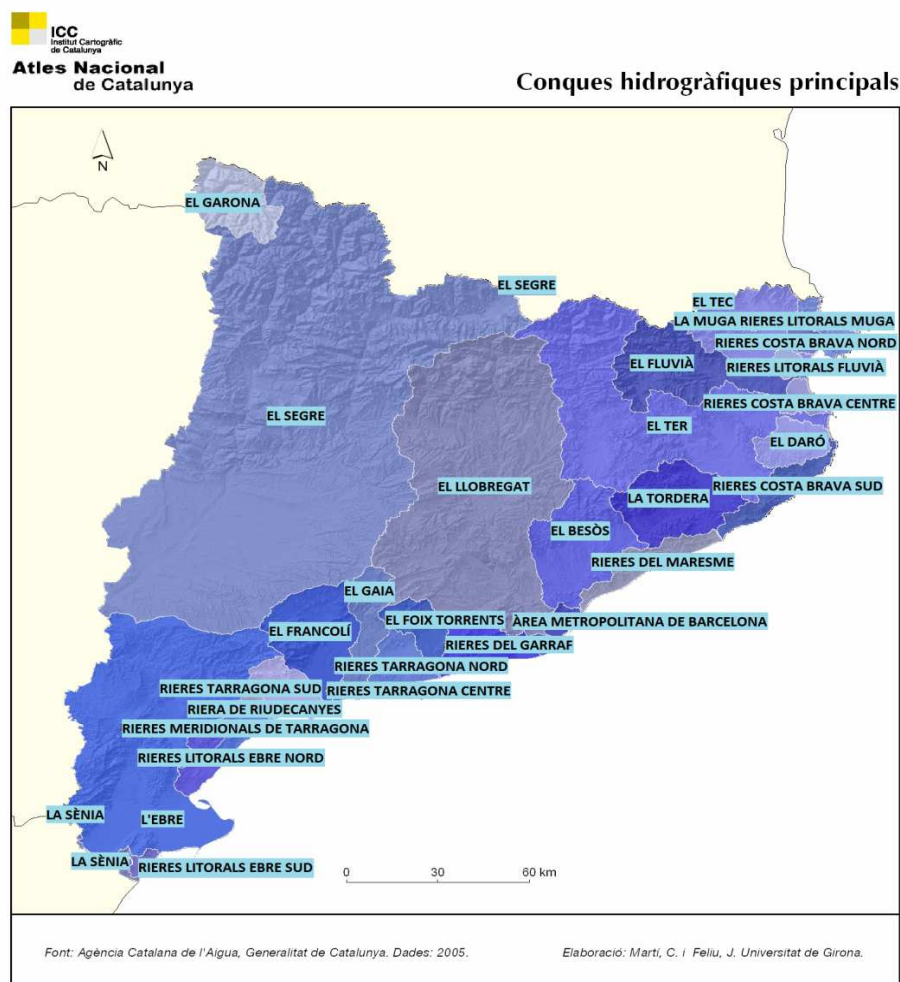
La particularidad del modelo estocástico es que los requerimientos de datos son bajos. Esencialmente se necesita la precipitación y la longitud de los ríos, datos fácilmente accesibles, permitiendo una alta aplicabilidad del modelo y resultando fácil la adquisición de los datos, gracias a la buena disponibilidad ACA, l'Agència Catalana de l'Aigua.

En este proyecto se muestra la variación de la presión de nitratos al variar las cantidades de nitrógeno que se introducen en el medio así estudiando, en un futuro, las posibles acciones futuras para una mejora ambiental.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

La cuenca del río Llobregat se encuentra íntegramente en la comunidad autónoma de Cataluña (trascurriendo por las provincias de Girona, Lleida y Barcelona). Ésta se halla ubicada entre los 41° 17' y 42° 22' de latitud Norte, en el área nororiental de la Península Ibérica. En la figura 1 se puede ver que limita al norte con los Pirineos, al este con las cuencas del Ter y el Besós, al oeste con la del Segre y al sur con el mar Mediterráneo. Se extiende a lo largo de 4 957 km<sup>2</sup>, drenando todas sus aguas al mar Mediterráneo. La longitud del propio río es de 170 km. Su situación dentro de la Comunidad autónoma de Cataluña se muestra también en la figura 1.



*Figura 1: Cuenca del río Llobregat dentro de Cataluña*

La cuenca del río Llobregat se encuentra perfectamente delimitada en tres grandes unidades de relieve: el Pirineo, la Depresión central y el Sistema mediterráneo.

Según indica Plana Castellví [1], en el Pirineo y el Prepirineo se localizan las máximas alturas, destacando la Sierra del Cadi (2 647 m) y el Pedraforca (2 497 m). Por su parte, la Depresión central es un área más baja y monótona en relación con los sistemas montañosos que la flanquean y caracterizada por la existencia de mesetas, las más elevadas de 700 a 900 m de altitud. En el sur nos encontramos con el Sistema mediterráneo, dividido a su vez en tres franjas perfectamente delimitadas: la Sierra prelitoral o del interior, la Sierra litoral y entre ambas se halla la Depresión prelitoral. Esta última aparece caracterizada por su gran actividad económica y fuerte densidad humana. En conjunto podemos perfilar una altura media para la cuenca del río Llobregat entre los 650-800 metros, existiendo un gran contraste entre las llanuras del Bajo Llobregat y el Pirineo.

La estructura fluvial de la cuenca presenta una jerarquización en función del caudal de cada uno de sus cursos fluviales. Existen cauces que sólo esporádicamente llevan agua por su vaguada; aparte de los torrentes, son la mayoría de las denominadas rieres, con un claro régimen de carácter pluvial. En un orden superior están los cauces con entidad fluvial propia; en este grupo se incluyen el Llobregat, el Cardener, el Anoia, etc., y algunas rieres como la de Rubí, Gavarresa y otras de menor importancia.

El principal río es el Llobregat, eje directriz de toda la cuenca y nexo de unión entre las diferentes comarcas. Su origen se encuentra en pleno Pirineo, en Castellar de n'Hug, a unos 1 280 metros de altura. En su primer trayecto se ve obligado a salvar fuertes desniveles, formando en su trazado abundantes desfiladeros, para posteriormente alcanzar la Depresión media o central.

El afluente principal es el río Cardener. Su origen se localiza asimismo en el Pirineo, a unos 1 050 metros de altitud, en el término municipal de Pedra i Coma, en la provincia de Lérida.

El segundo afluente en importancia es el río Anoia. Nacido en la comarca de Odena, a unos 550 metros de altura, muy próximo a los altos de la Penedella, desagua en el Llobregat, a la altura de Martorell, en el contacto con la Cordillera litoral.

En cuanto a la geología, en el área norte correspondiente a los Pirineos, sobresale el paleozoico formado a base de granito, pizarras, esquistos, cuarcitas y afloramientos secundarios de calizas. También aparecen manchas de margas azules del Eoceno marino y conglomerados del Oligoceno.

En la Depresión media la preponderancia de margas, areniscas y manchas de evaporitas del Oligoceno, hasta Manresa, es total. Es a partir de este punto cuando las areniscas, margas azules y conglomerados calcáreos del Eoceno-Oligoceno marcarán la pauta en la composición de la Sierra prelitoral del sistema montañoso mediterráneo.

Por su parte, la Depresión prelitoral se encuentra constituida por materiales también terciarios, con profusión de arenas margosas con cantos del Mioceno.

En lo que respecta a la Sierra litoral aparecen terrenos primarios a base de granito, pizarras, esquistos y calizas del Secundario. Por último, entre la Sierra litoral y el mar Mediterráneo aparecen gravas, arcillas, arenas y limos del Cuaternario.

## **2.2 USOS ANTROPOLÓGICOS DEL SUELO**

La superficie de la cuenca del Llobregat se caracteriza por su versatilidad y por sus diversos usos. Se puede dividir la superficie según el uso que se haga del suelo. Según el Instituto de Estadística Catalán (Idescat), el suelo se divide de la siguiente forma en función de su uso:

Cultivo: Tierra cultivada. Incluye terrenos sembrados, plantaciones de especies anuales y plurianuales (herbáceos, leñosos, de regadío y de secano, así como también los barbechos).

Suelo sin vegetación: Superficie desprovista de plantas. Incluye suelos desnudos, roquedas, escarpes, pedrizas, arroyaderos, arenales, playas y neveros, así como ríos, lagos y embalses.

Suelo urbano, urbanizable e infraestructuras: Superficie que incluye núcleos urbanos y urbanizables, zonas urbanas de baja densidad, zonas industriales y comerciales, infraestructuras viarias, etc.

Superficie forestal: Terreno cubierto de árboles o arbustos y no destinado a fines agrícolas. Incluye: bosque (terreno poblado por árboles), maleza (maquias, matorrales y situaciones de tráfico entre bosque y matorrales), otra vegetación (prados, pastos, herbazales, vegetación de zonas húmedas, baldíos y áreas quemadas), planteles y otros espacios relacionados con la explotación, como por ejemplo las pistas forestales y los cortafuegos.

## 2.3 DEMOGRAFÍA DE LA CUENCA DEL LLOBREGAT

Esta cuenca se extiende a lo largo de tres provincias (Girona, Lleida y Barcelona) y sobre 11 comarcas catalanas. La población que habita en la cuenca del Llobregat asciende a 1 350 162 personas a diciembre de 2011. En la tabla 1 se enumera la población según la comarca.

*Tabla 1: Datos demográficos totales y de la cuenca del Llobregat*

COMARCA	POBLACIÓN TOTAL	POBLACIÓN DE LA CUENCA
Berguedà	41 540	41 540
Ripollès	26 393	430
Solsonès	13 808	12 576
Bages	185 865	185 865
Osona	154 204	5 944
Anoia	118 509	117 913
Vallés Oriental	399 900	3 121
Vallés Occidental	898 260	324 720
Alt Penedès	105 670	38 807
Baix Llobregat	803 705	619 246
<b>TOTAL</b>	<b>2 747 854</b>	<b>1 350 162</b>

FUENTE: Instituto de Estadística de Cataluña

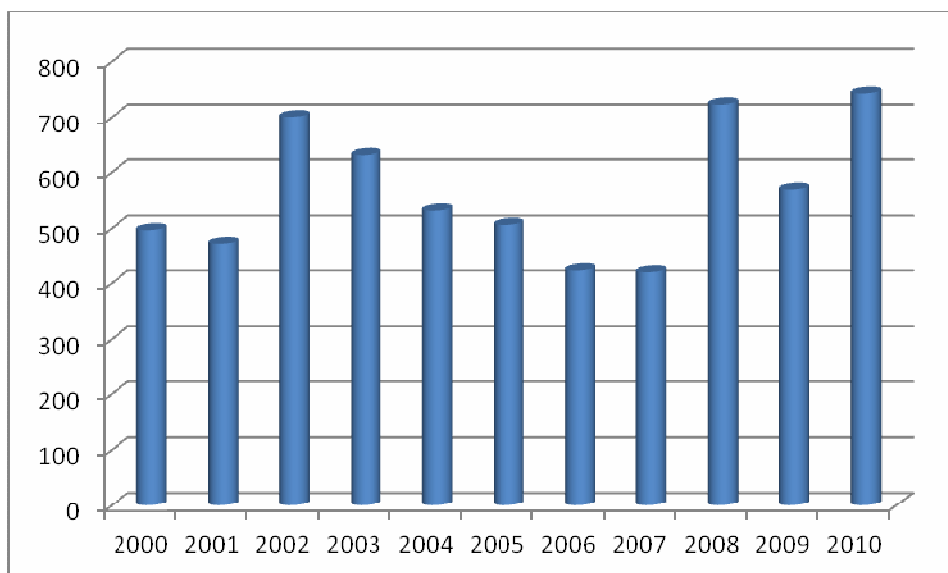
## 2.4 DATOS PLUVIOMÉTRICOS Y DE ESCORRENTÍA

Los datos de pluviometría se han recogido por medio de 35 pluviómetros que se encuentran a lo largo de la cuenca del Llobregat. De ese total, 16 pertenecen a la Agència catalana de l'aigua (ACA), mientras que las 19 estaciones restantes pertenecen al Servei de Meteorologia de Catalunya (SMC).

La metodología usada para el cálculo de la precipitación en toda la cuenca ha sido la media aritmética de los datos disponibles de cada año.

En cuanto a los datos pluviométricos, los datos del Servei Meteorologic de Catalunya anteriores a 2004 son escasos debido a la falta de estaciones pluviométricas. Después, entre 2004 y 2007, se procedieron a la gestión de todas sus estaciones, en las que aparecen datos a partir de 2007. La ausencia destacable de datos entre estos años se debió a la entrada en vigor de la Ley 15/2001, de 14 de noviembre, de meteorología, ya que a partir de 2002 el Servei Meteorologic de Catalunya pasó a gestionar las diferentes redes de equipamientos meteorológicos que hasta la fecha habían sido gestionados de manera independiente por diferentes organismos de la Generalitat de Catalunya. Durante ese periodo, el SMC ha tenido que dar una homogeneidad imprescindible en la forma de llevar a cabo las medidas y el control de calidad de las estaciones meteorológicas automáticas y habilitar una mejora en el sistema de gestión de los datos. En cuanto a los datos del ACA, la ausencia de datos se acentúa a partir de 2008.

La media pluviométrica del Llobregat es de 675 mm según el plan de gestión de las cuencas catalanas realizadas por la Generalitat de Catalunya. Con los datos obtenidos en este proyecto, la precipitación media de la cuenca es de 565,14 mm entre los años 2000 y 2010. Los datos se muestran en la figura 2.

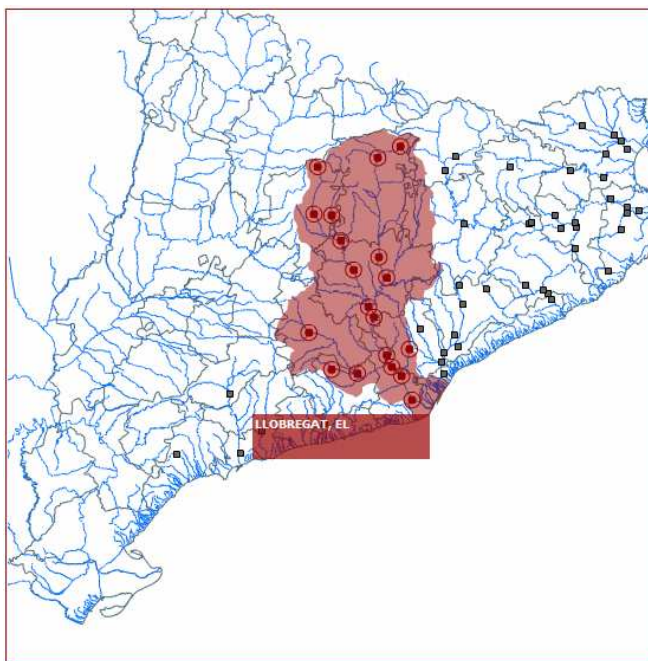


*Figura 2: Evolución de la precipitación anual en milímetros sobre la cuenca del río Llobregat*



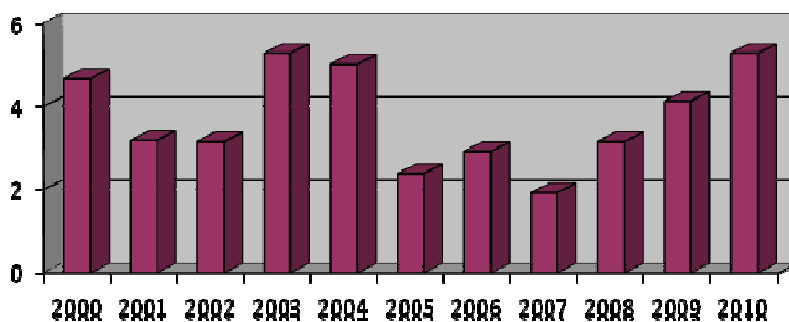
## 2.5 DATOS DE CAUDALES

Con respecto al caudal de la cuenca del Llobregat, el dato ha sido calculado por medio de 14 de las 18 estaciones de medición de caudales distribuidos a lo largo de dicha cuenca, las cuales se muestran en la figura 3. Esto se debe a que en cuatro de ellas faltan más de dos datos de caudales anuales desde el año 2000 al 2010.



*Figura 3: Situación de las 18 estaciones de aforo dentro de la cuenca del Llobregat*

La figura 4 muestra los datos medidos de estas estaciones de aforo. El caudal mínimo es de  $1,93 \text{ m}^3/\text{s}$  y data del año 2007 mientras que el caudal máximo se da en el año 2010 con un caudal de  $5,28 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos datos se han calculado mediante media aritmética de las distintas estaciones de aforo.



*Figura 4: Evolución del caudal anual en  $\text{m}^3/\text{s}$  en la cuenca del Llobregat*

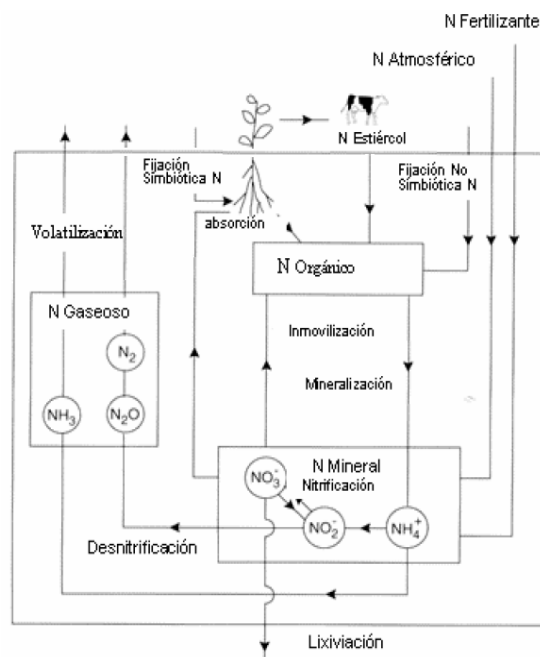
## 2.6 CICLO DEL NITRÓGENO

### 2.6.1 Ciclo natural del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento esencial para los seres vivos ya que es un componente fundamental del ADN, ARN y las proteínas. El nitrógeno es un elemento muy versátil que existe en forma orgánica e inorgánica. Un gran número de transformaciones bioquímicas de nitrógeno son posibles ya que el nitrógeno se encuentra en la naturaleza en gran número de estados de oxidación: amonio (-3), nitrógeno molecular (+0), óxido de nitrógeno (+1), nitrito (-3) y nitrato (+5). La forma más abundante de nitrógeno en la atmósfera es el nitrógeno molecular ( $N_2$ ) que es la especie menos reactiva. Al igual que otros ciclos, como el del carbono o el del azufre, el del nitrógeno consiste en varios depósitos y procesos mediante los cuales se intercambia nitrógeno.

Como se puede observar en la figura 5, primeramente el nitrógeno atmosférico (que constituye el 78% en volumen de la atmósfera terrestre), se introduce de forma natural en el terreno por medio del proceso de fijación. Este proceso es esencial porque es la única manera en la que los organismos pueden obtener el nitrógeno directamente de la atmósfera. Se realiza de tres formas distintas: la primera de forma, llamada simbiótica, consiste en bacterias que a través de procesos metabólicos fijan el nitrógeno viviendo en simbiosis con determinado tipo de plantas. La segunda forma es la no simbiótica: similar a la anterior pero son fijadoras de nitrógeno libre. Por último, la tercera forma se llama abiótica, consistente en que el nitrógeno es fijado por medio de energía natural (procedente de relámpagos, fuegos forestales y coladas de lava) que rompen los triples enlaces del  $N_2$ , haciendo alcanzables las moléculas de nitrógeno para su transformación química.

Al pasar a amonio, parte de éste es tomado para su incorporación a la materia orgánica. Este proceso se denomina inmovilización. Aquí, el amonio es incorporado en una proteína y en otros compuestos de nitrógeno orgánico a los seres vegetales y éstos a los animales, llegando a la cima de la cadena alimentaria. Finalmente, los seres animales mueren, descomponiendo las bacterias y los hongos la materia orgánica y transforman de nuevo el nitrógeno orgánico en amonio. Este proceso se denomina mineralización.



**Figura 5: Ciclo del nitrógeno**

El amonio que no ha sido tomado y el procedente de la mineralización se transforma en nitritos y más tarde en nitratos por medio de la nitrificación. También llevado por bacterias, requiere la presencia de oxígeno, por lo que se realiza en ambientes ricos de oxígeno (en el agua y en capas ricas superiores por ejemplo). El  $\text{NH}_4^+$  tiene carga positiva, esto hace que se mantenga en el suelo y no sea barrido por las aguas. En cambio, el  $\text{NO}_2^-$  y el  $\text{NO}_3^-$ , al tener la carga negativa, no se mantienen en el suelo y son barridos por las aguas, llevando a una disminución de la fertilidad del suelo y a un enriquecimiento de las aguas.

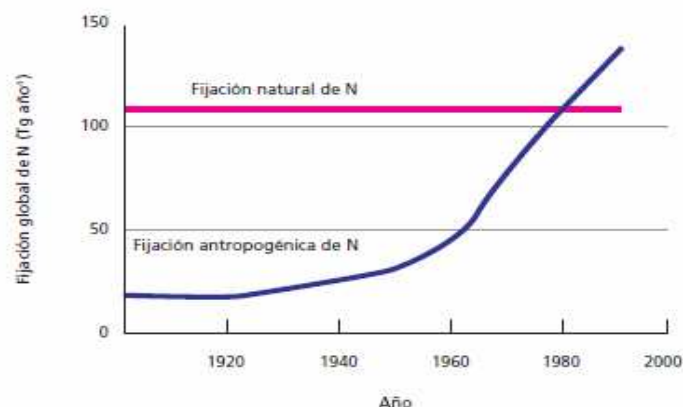
Finalizando el ciclo del nitrógeno, hay formas naturales que hacen que la cantidad de nitratos presentes en los terrenos disminuya. La asimilación es un proceso por el que los nitratos son fijados por la materia orgánica y la desnitrificación, proceso anaerobio llevado a cabo por bacterias, producen la eliminación de nitratos convirtiéndolos en  $\text{N}_2$  atmosférico,  $\text{N}_2\text{O}$  (gas de efecto invernadero) y en NO (smog).

### 2.6.2 Alteración del ciclo del nitrógeno

El descubrimiento de la reacción de Haber, patentada en 1908 por Fritz Haber permite obtener, fijando a altas temperaturas y presiones, nitrógeno gas atmosférico en amonio para su uso en fertilizantes. Esto supone una nueva componente tecnológica de la fijación de nitrógeno que fija actualmente aproximadamente  $154 \text{ Tg} (10^{12} \text{ g})$  de nitrógeno atmosférico, más que los procesos de fijación de nitrógeno que ocurren a través de la actividad nitrogenasa presente en plantas y microorganismos terrestres y marinos.

Por ello y por el cambio climático, se está alterando el ciclo del nitrógeno. La actividad humana ha perturbado la condición de estado estacionario de este ciclo, acelerando de forma notable la fijación de nitrógeno. La tasa de producción de fertilizantes de nitrógeno ha ido incrementándose de forma exponencial desde que a principios del siglo XX se descubriera la reacción de Haber, creando así fertilizantes que podían ser añadidos directamente al suelo. Los niveles de producción de fertilizantes de nitrógeno fueron de aproximadamente  $80 \cdot 10^{12} \text{ g N año}^{-1}$  en 1995 y se prevé que supere los  $140 \cdot 10^{12} \text{ g N año}^{-1}$  en 2020. La evolución de la fijación natural y antropogénica de nitrógeno se pueden observar en la figura 6, en la que se aprecia el incremento exponencial de la fijación antropogénica como consecuencia del incremento en la producción de fertilizantes de nitrógeno. A principios del siglo pasado la fijación antropogénica únicamente representaba un 15% de la natural, mientras que en 1980 la fijación antropogénica se igualó a la natural, superándola en la actualidad en más del 35%. Este enriquecimiento de nitrógeno estimula las tasas de nitrificación y desnitrificación, produciendo un incremento de  $\text{N}_2\text{O}$  en la atmósfera. [2]

También la combustión de combustibles fósiles libera actualmente alrededor de  $20 \cdot 10^{12} \text{ g N año}^{-1}$  en forma de  $\text{N}_2\text{O}$ . La concentración de  $\text{N}_2\text{O}$  en la atmósfera se incrementó desde la época preindustrial con valores de 273 ppbv a 310 ppbv en el año 2000.



*Figura 6: Evolución de la fijación anual de nitrógeno*

Algunos fertilizantes de nitrógeno aplicados en agricultura son arrastrados por el agua de lluvia o acumulados en el agua del suelo y acuíferos subterráneos.

El agua del suelo que se usa como fuente de agua potable puede provocar cáncer en humanos si contiene concentraciones excesivas de nitrógeno. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos ha establecido un estándar de nitrógeno para agua potable de  $10 \text{ mg L}^{-1}$ . En aguas que no han sido alteradas por la actividad humana, la concentración no supera  $1 \text{ mg L}^{-1}$ . El exceso de nitrógeno arrastrado por las aguas llegará a la costa a través de los ríos contaminados, generando un enriquecimiento costero en nitrógeno conocido como eutrofización, produciendo una pérdida de calidad del agua, con proliferaciones algales que pueden dar lugar a, entre otros efectos negativos, eventos de muerte de peces cerca de la costa y cambios de la distribución de especies en el ecosistema costero afectado. De hecho, el transporte atmosférico del nitrógeno emitido a la atmósfera por la actividad humana ha llevado a que la deposición de nitrógeno al océano se duplique, posiblemente provocando un aumento de la producción primaria en el océano.

El impacto de la actividad humana sobre el ciclo del nitrógeno queda también reflejado en el hecho de que tanto la exportación de nitrógeno de cuencas hidrológicas, como la concentración de nitrógeno reactivo en aguas de los ríos más importantes del planeta, aumentan con la densidad de población en sus cuencas. Las perturbaciones observadas en el ciclo global de nitrógeno tienen importantes implicaciones en el potencial incremento del efecto invernadero y sus consecuencias medioambientales, y han sido producidas

básicamente por dos procesos antropogénicos: el incremento de la producción de fertilizantes y el uso de combustibles fósiles.

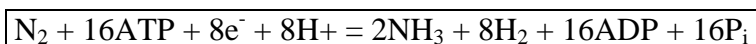
## **2.7 PROCESOS QUE AUMENTAN EL NIVEL DE NITRÓGENO**

### **2.7.1 Deposición atmosférica**

La deposición atmosférica ha ido aumentando debido al incremento de gases contaminantes provenientes de las actividades humanas, fundamentalmente por el uso de combustibles fósiles. Considerada como una fuente difusa, la deposición atmosférica del nitrógeno en forma de  $N_2$  puede ser debida a procesos físicos (fijación abiótica) o a procesos en los que intervengan microorganismos (fijación biológica o biótica).

En cuanto a la fijación abiótica, el  $N_2$  por medio de los rayos solares y procesos físicos se convierten en otros compuestos nitrogenados que, por acción de la lluvia, precipitan sobre el terreno. Hay dos tipos de deposiciones de nitrógeno: deposición seca y húmeda. La deposición seca consiste en la introducción del contaminante de la atmósfera al suelo por acción del viento y la gravedad, mientras que la deposición húmeda trata la vía en que el contaminante entra en el suelo disuelto en el agua de lluvia.

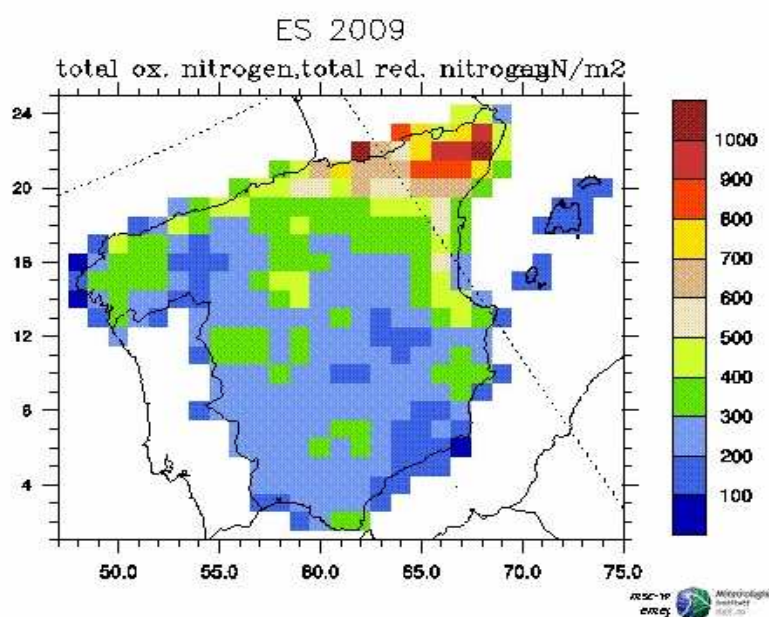
La fijación biológica o biótica del nitrógeno consiste en la incorporación del nitrógeno atmosférico a las plantas, gracias a algunos microorganismos, principalmente bacterias y cianobacterias que se encuentran presentes en el suelo y en ambientes acuáticos. Esta fijación se da por medio de la conversión de nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) en amoníaco ( $NH_3$ ) o nitratos ( $NO_3^-$ ). [3]



Los datos de la deposición atmosférica han sido hallados por medio del European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP). Es un programa internacional de cooperación para el seguimiento y la evaluación del transporte a gran distancia de contaminantes atmosféricos por Europa, que permite reflejar los problemas relacionados con la polución atmosférica, emisiones y gestiones que se hagan al respecto.

El programa EMEP se basa en tres elementos principales: la recogida de datos de emisiones, las mediciones de la calidad del aire y la precipitación y la modelización del transporte atmosférico y la deposición de los contaminantes del aire.

Por medio de este modelo, se han recogido los datos pertenecientes a España. Con ellos, se han detectado los datos procedentes únicamente de Cataluña y con éstos se ha calculado la deposición atmosférica biológica y abiótica tanto húmeda como seca del nitrógeno atmosférico. Un ejemplo de los resultados se muestra en la figura 7.



*Figura 7: Mapa resultado del modelo de EMEP sobre deposición atmosférica*

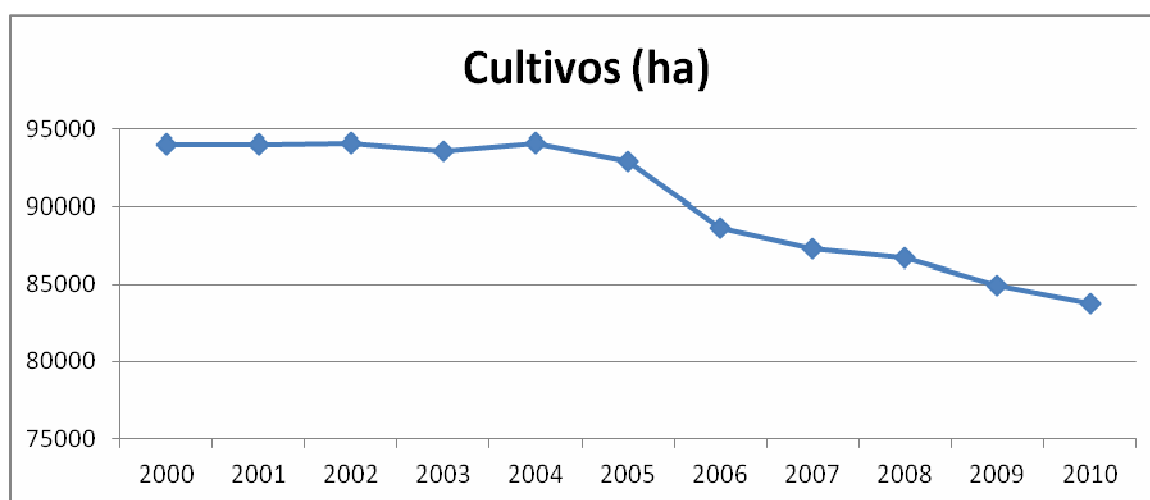
### 2.7.2 Fertilizantes y abonos

Según el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio [4], en su publicación de editorial técnica de ahorro y eficiencia energética en la agricultura del 2007, se puede comprobar que el nitrógeno es el elemento fertilizante más utilizado en España, aproximadamente el doble que cada uno de los otros dos elementos fundamentales, el fósforo y el potasio (en 2005 se usaron 927 000 toneladas de nitrógeno frente a las 513 000 toneladas de compuestos con fósforo y 414 000 de compuestos con potasio). Por ello el nitrógeno aportado por los fertilizantes es tenido en cuenta como fuente potencial en este proyecto.

Los fertilizantes nitrogenados poseen como base el amoníaco para su formación: urea, sulfato de amonio, fosfato de amonio y nitrato de amonio son algún ejemplo. Al emplearse en la agricultura, estos compuestos pasan al suelo y por medio de la nitrificación se convierten en nitratos. El problema que se produce es que los nitratos son muy móviles y no son retenidos por el suelo, perdiéndose fácilmente por lixiviación de los suelos, a menos que las partículas de suelo generen cargas positivas [5]. Por todo esto, los fertilizantes y abonos entran dentro de las fuentes difusas.

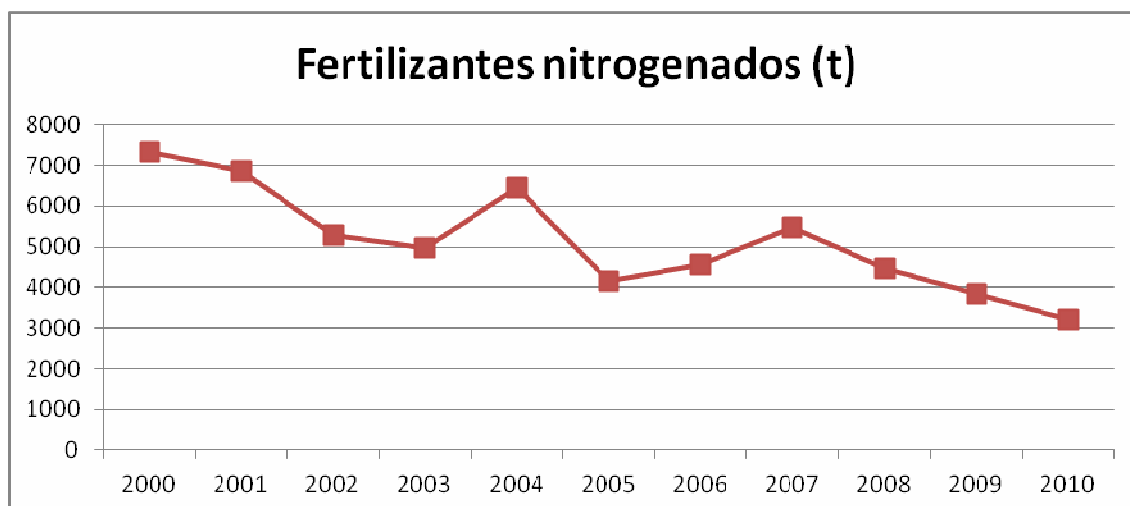
Los cultivos de secano ejercen presión sobre las aguas subterráneas, ya que los nutrientes que se aplican no pueden ser totalmente absorbidos por las plantas. Los excedentes permanecen en el suelo y pueden acabar en los acuíferos arrastrados por la infiltración del agua de lluvia. Los cultivos de regadío, a pesar de encontrarse en menor proporción en relación con la superficie del territorio que ocupan, ejercen una presión elevada por la cantidad de nutrientes y fertilizantes que se aplican.

La tendencia tanto en la superficie cultivada como en el uso de fertilizantes nitrogenados es a la baja, como se muestran en las figuras 8 y 9 respectivamente. En ellas se ven las totalidades de hectáreas de cultivo utilizadas y las toneladas de fertilizante nitrogenados usadas respectivamente.



*Figura 8: Evolución de la superficie de suelo cultivado*





*Figura 9: uso de fertilizantes nitrogenados en la cuenca del Llobregat.*

### **2.7.3 Planta de tratamiento de aguas residuales**

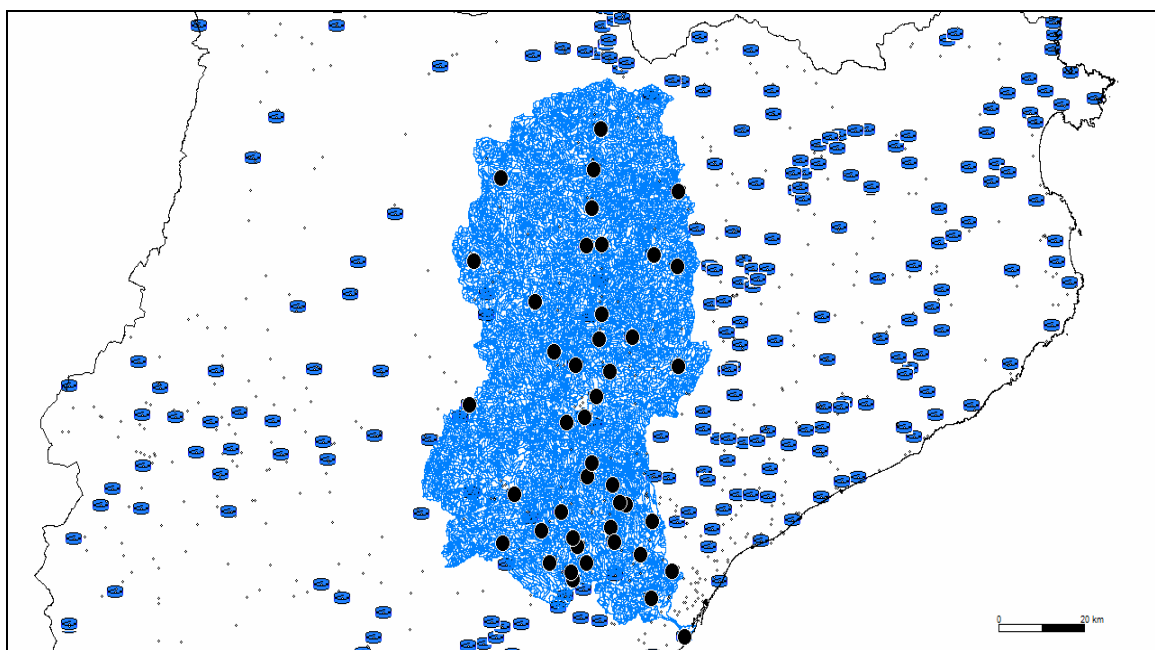
La función de estas instalaciones es eliminar la contaminación presente en las aguas residuales hasta reducirla a límites aceptables para el medio receptor. Este procedimiento se lleva a cabo en un conjunto de instalaciones llamadas sistemas de saneamiento, cuyo objetivo es la reducción de esta contaminación y su posterior devolución al medio del agua en las condiciones adecuadas para que altere lo mínimo posible los parámetros físicos, químicos y biológicos del medio receptor, o para ser reutilizada. [6]

Según el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, establece que las aguas depuradas no pueden usarse para el consumo humano ni para la industria alimentaria entre otros. Por ello, este tipo de aguas se pueden usar fundamentalmente para regadío de suelos urbanos, usos agrícolas, usos industriales, usos recreativos y usos ambientales. También se pueden verter de nuevo al río o al mar.

En Cataluña concretamente existe el Programa de Saneamiento de Aguas Residuales Urbanas (PSARU), programa que se enmarca entre la Directiva 92/271/CEE sobre el tratamiento de aguas residuales y la Directiva 2000/60/CEE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, orientada a la protección de las aguas y que pretende conseguir un buen estado de las masas de agua superficiales, mediante el desarrollo de medidas de protección, mejora y regeneración de dichas masas.

Estas instalaciones, aunque traten la mayoría de los elementos contaminantes de las aguas residuales provenientes de las ciudades, no depuran totalmente el agua quedando restos, entre otros, de nitratos. En la actualidad, estos límites de vertido en el medio están fijados por la Directiva 91/271/CEE (RD 11/95 y RD 509/96), cuyo valor es de 10 mg/L.

En la cuenca del Llobregat hay 64 plantas de tratamiento de aguas residuales aunque en este proyecto sólo tenemos en cuenta 45, motivado por la falta de datos de las que no se han tenido en cuenta. Los datos para el cálculo del total de nitrógeno que vierten directamente a los cursos fluviales se encuentran descritos en el anejo E, siendo el dato total de la cuenca de 3 660 123,28 kg/año. Las localizaciones de estas depuradoras, llamadas también Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) se muestran en la figura 10, realizada mediante el programa de SIG MiraMon.



*Figura 10: Situación de las 45 EDAR sobre la cuenca del río Llobregat*

#### **2.7.4 Descargas industriales**

En la cuenca del río Llobregat, los principales focos de contaminación de origen industrial se localizan en el Baix Llobregat y la cuenca del río Anoia según el ACA [7]. Fundamentalmente, las industrias con mayor presencia en la cuenca del Llobregat son en orden de importancia las del sector alimentario, químico, textil y papel principalmente [8].

En Cataluña existe el Programa de Saneamiento de las Aguas Residuales Industriales (PSARI). Realizado en 2003, pretende alcanzar un objetivo de calidad del medio hídrico

catalán, y por tanto, del Llobregat, mejorando la calidad de los vertidos industriales. Según este informe (el más actual en cuanto a tipo de residuos industriales) a 1 de enero de 2001 se contabilizaron un conjunto de vertidos de 28 074. De este número de vertidos, 21 352 son vertidos domésticos, 1 348 del sector terciario y 5 374 son vertidos de tipo industrial. Del total de los vertidos industriales, el 67,10% están conectados al sistema de depuración de aguas (3 606) mientras que el restante 32,90% (1 708) se vierten directamente al medio físico (cauce de los ríos: 1 645, al mar: 20, otras técnicas: 103).

Del total de 3 606 vertidos que se trataron en plantas de saneamiento de aguas industriales, 714 (el 20% del total) corresponden a la cuenca del Llobregat (101 en la cuenca del Anoia, afluente del Llobregat) [9].

Para nuestro trabajo, hemos usado unos datos provenientes del ICRA, Institut Català de Recerca de l'Aigua. Según estos datos, que se encuentran detallados en la tabla 2, se miden unos vertidos anuales de 7 211,43 t/año de  $\text{NO}_3^-$ .

*Tabla 2: Descargas industriales en la cuenca del Llobregat*

SUBCUENCAS		CARGA (t/año)	Nº Sub. ICRA
Riera Gavarresa	1	121,36	3
Cardener - Suria	2	14,47	4
Riera del Rubí	3	53,46	2
Anoia - Jorba	4	0,61	1
Anoia - Sant Saduní d'Anoia	5	469,47	5
Llobregat - Guardiola de Berg	6	1,80	1
Llobregat - Balsareny	7	19,30	4
Llobregat - Abrera	8	366,70	18
Llobregat - Sant Joan Despí	9	6 164,27	12
<b>TOTAL</b>		<b>7 211,43</b>	<b>50</b>

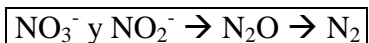
FUENTE: Institut Català de Recerca de l'Aigua

## 2.8 PROCESOS QUE DISMINUYEN EL NIVEL DE NITRÓGENO

Hay procesos naturales que producen un descenso de la concentración de nitratos en el suelo o en el agua. Estos procesos son importantes en el modelo y hay que tenerlos debidamente en cuenta ya que afectan al resultado, produciendo un dato final más veraz. Estos procesos son los que mencionan a continuación.

### 2.8.1 Desnitrificación

La desnitrificación es la reducción bioquímica del ión nitrato presente en el suelo o el agua, a óxido de nitrógeno o como nitrógeno molecular, que es la sustancia más abundante en la composición del aire, regresando así a la atmósfera. Este proceso se consigue bajo condiciones anaerobias.

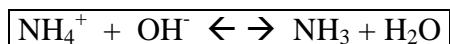


Este proceso se realiza por medio de microorganismos y los factores que inciden directamente en las cantidades de nitratos perdidos son:

- Disponibilidad de nitratos: a mayor contenido de nitratos la magnitud de la pérdida aumenta.
- Contenido hídrico del suelo: con elevados contenidos hídricos mayores al 70 – 80 % de agua útil durante periodos prolongados es mayor la ocurrencia de la desnitrificación.
- Contenido de materia orgánica: relacionada con la población bacteriana del suelo. Cuanto mayor es la cantidad de bacterias, mayor desnitrificación habrá.
- Temperatura: a mayor temperatura, mayor ocurrencia de este proceso.
- pH: una reacción del suelo neutra o ligeramente alcalina, promueven la desnitrificación por el efecto sobre la actividad biológica bacteriana del suelo.

### 2.8.2 Volatilización

La volatilización del nitrógeno es un proceso que ocurre de forma natural. Consiste en la pérdida del gas amonio del suelo. Bajo condiciones alcalinas los iones amonio son convertidos a moléculas de amoniaco en solución, las cuales después pueden ser liberadas a la atmósfera. La reacción que tiene lugar es la siguiente:



Fundamentalmente con los pesticidas, al llevar amoniaco, ocurre que el compuesto de nitrógeno (como por ejemplo la urea) se convierte en amonio y éste, por la reacción

descrita anteriormente se forma amoníaco gas saliendo a la superficie y con ello yendo a la atmósfera.

### **2.8.3 Retención del nitrógeno en el suelo**

Los nitratos que se originan del suelo siguen diversos caminos después de su formación. Como ya se sabe, al haber una gran proliferación de nitratos, al ser solubles, lixivian a las aguas subterráneas o a las aguas superficiales. Pero otra opción de camino es la retención o almacenamiento de los nitratos en el suelo donde se han formado.

La cantidad de nitratos que se lixivian hacia el subsuelo depende del régimen de pluviosidad y del tipo del suelo. En el caso en que los suelos posean abundantes partículas coloidales, tanto orgánicas como inorgánicas, cargadas negativamente, repelerán a los aniones (es decir, los nitratos), y como consecuencia, estos suelos lixiviarán con facilidad los nitratos. Por el contrario, los suelos que adquieren carga positiva, por tanto, manifiestan una fuerte retención para los nitratos.

### **2.8.4 Asimilación del nitrógeno por las cosechas y la vegetación**

La presencia del nitrógeno es indispensable para promover el crecimiento de tallos y hojas en pastos y plantas en general ya que a nivel nutricional, el nitrógeno es el componente de los aminoácidos, de los ácidos nucleicos, de los nucleótidos, de la clorofila y de las coenzimas de la planta. Corrige los suelos alcalinos dándoles mayor acidez, asimismo, el nitrógeno es un elemento fundamental en la nutrición de los microorganismos que existen en el suelo, los cuales son indispensables para la nutrición de las plantas. Ya en un segundo término, el nitrógeno también tiene un uso estético al proporcionar el color verde a las plantas o cosechas.

La forma en que el nitrógeno debe de estar para asimilarlo es en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ).

### **2.8.5 Sedimentación neta**

Los nitratos se sedimentan en los cauces de los ríos, siendo una especie de almacenaje de nitratos. Se puede comparar, aunque en menor medida, con el almacenaje en el subsuelo.

## 2.9 DIRECTIVA MARCO DEL AGUA Y DIRECTIVA EUROPEA SOBRE NITRATOS

En este apartado se va a hablar de dos leyes muy importantes en Europa en cuanto a los nitratos se refieren. La primera de ellas es la Directiva Europea de Nitratos, (91/676/CEE) relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. Más tarde, se produciría la ratificación de la Directiva Marco del agua (200/60/CE) por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Estas dos directivas europeas han sido de gran ayuda para la lucha contra la contaminación por nitratos y han marcado unas pautas de actuación y de estudio de las masas de agua, siendo esto causa de la realización de este proyecto.

*La Directiva Marco del Agua* es un marco comunitario europeo de actuación en el ámbito de la política de aguas cuyo objetivo es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas que, entre otros, tenga por objeto una mayor protección y mejora del medio acuático mediante medidas específicas de reducción progresiva de vertidos, emisiones y pérdidas de sustancias peligrosas prioritarias. [9]

Para conseguir este objetivo, los estados miembros (entre ellos España) tienen que realizar seguimientos de medida de factores ecológicos o químicos entre otros. Concretamente el artículo 5 de esta directiva, cuyo título es “Características de la demarcación hidrográfica, estudio del impacto ambiental de la actividad humana y análisis económico del uso del agua”, marca que cada estado miembro velará porque se efectúe en cada demarcación hidrográfica:

- Un análisis de las características de la demarcación.
- Un estudio de las repercusiones humanas.
- Un análisis económico del uso del agua.

En este caso, este proyecto y en definitiva este estudio se enmarca dentro de las repercusiones humanas a una demarcación hidrográfica, en este caso, a las aguas de la cuenca del río Llobregat.

*La Directiva Europea de Nitratos* es una directiva relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. Tiene por objetivo reducir la contaminación causada o provocada por los nitratos de origen agrario y actuar preventivamente contra nuevas contaminaciones de dicha clase.

Esta directiva dice que los Estados miembros determinarán las aguas afectadas por la contaminación y las aguas que podrían verse afectadas por la contaminación si no se toman medidas de conformidad con lo dispuesto en el artículo 5. Con el objetivo de establecer para todas las aguas un nivel general de protección contra la contaminación, los Estados miembros elaborarán uno o más códigos de prácticas agrarias correctas que podrán poner en efecto los agricultores de forma voluntaria. También establecerán unos programas de fomento de la puesta en ejecución de dichos códigos de prácticas agrarias correctas. [10]

Según el artículo 5, los programas de acción tendrán en cuenta los datos científicos y técnicos de que se dispongan, principalmente con referencia a las respectivas aportaciones de nitrógeno procedentes de fuentes agrarias o de otro tipo. Con ello, se elaborarán programas de control adecuados para evaluar la eficacia de los programas de acción establecidos.

Finalmente, con el modelo propuesto en este proyecto, se puede hallar la repercusión de las distintas fuentes de nitratos, así como la evaluación de las distintas medidas de remediación propuestas y sus resultados en toda las cuencas y en las subcuencas intermedias.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 EL MODELO ESTOCÁSTICO

El método empleado en este proyecto es una estimación mediante un modelo matemático estocástico [11]. El modelo propuesto consiste en un modelo conceptual simplificado que distingue entre dos diferentes vías de transferencia de nitrógeno desde las fuentes a los cursos fluviales: el nitrógeno que pasa a través del terreno antes de que encuentre una corriente o curso de agua y el nitrógeno introducido directamente en el río. La primera vía sucede con las fuentes difusas y la segunda vía con las fuentes aisladas. El modelo considera los fertilizantes aplicados en la agricultura y la deposición atmosférica como fuentes difusas mientras que las plantas de tratamiento de aguas residuales y las descargas industriales como fuentes aisladas.

El área de estudio se ha dividido en un número de subcuencas de acuerdo con los datos disponibles. En cada subcuenca la carga de nitrógeno del río está relacionada con la suma de las diferentes fuentes de nitrógeno, reducido por los procesos que producen una pérdida de nitrógeno (tanto en la tierra como en el agua). La eliminación del nitrógeno que ocurre tanto en el agua como en el suelo es modelado en función de las características de la cuenca. La carga de nitrógeno estimada a la salida de cada subcuenca es introducida en la siguiente como una fuente aislada adicional río abajo de la subcuenca. La carga a la salida de la subcuenca  $i$  es expresada como:

$$L_i = x_{DS,i} B_i R_i + x_{PS,i} R_i + \epsilon$$

Donde:

$L_i$  Carga de nitrógeno (t N/año).

$B_i$  Constante de reducción debido a la pérdida de nitrógeno en el terreno (adimensional).

$R_i$  Constante de reducción debido a la pérdida de nitrógeno en el agua (adimensional).

$x_{DS,i}$  Suma de las fuentes difusas.

$x_{PS,i}$  Suma de las fuentes aisladas.



$\varepsilon$  Error cometido.

Las pérdidas de nitrógeno que se suceden en el terreno hasta que llega al curso de agua tienen relación con las lluvias acaecidas, mientras que la pérdida del nitrógeno en los ríos es en función de la longitud de los mismos. Por ello, la eliminación de nitrógeno es parametrizada por funciones exponenciales decrecientes:

$$B_i = \exp(-\alpha_P X_{P,i})$$

$$R_i = \exp(-\alpha_L X_{L,i})$$

Donde:

$X_{P,i}$  Lluvia normalizada (adimensional).

$X_{L,i}$  Longitud del río normalizado (adimensional).

$\alpha_P$  Coeficiente de lluvia (adimensional).

$\alpha_L$  Coeficiente de longitud del río (adimensional).

La constante de reducción debido a la pérdida de nitrógeno en el terreno incluye las pérdidas debidas al consumo de las cosechas, la desnitrificación, la volatilización y el almacenamiento en el suelo. La constante de reducción debido a la pérdida de nitrógeno en el curso fluvial incluye la desnitrificación, la volatilización, el consumo de las plantas y la sedimentación neta. Con ello, las fuentes difusas están reducidas por las dos constantes, mientras que las fuentes aisladas solamente se reducen por medio de la constante que tiene en cuenta la longitud del río.

Con el fin de comparar los diferentes parámetros, la lluvia y la longitud del río fueron normalizadas por su máximo valor antes de introducirlo en el modelo. La lluvia a diferencia de la longitud del río, tiene una influencia positiva en la pérdida de nitrógeno, así que sus valores han sido tomados de una forma recíproca. En esta vía todos los coeficientes alfa se esperan que sean positivos. [12]

### 3.2 PARÁMETROS DEL MODELO

Los parámetros escogidos para el modelo han sido la lluvia y la longitud del río. Los motivos principales de esta elección han sido su fácil disposición y porque puede dar cuenta de la variabilidad de las exportaciones de nitrógeno a los ríos. Por otra parte, poseen

una influencia en los procesos físicos responsables del transporte y transformación del nitrógeno a lo largo de la cuenca.

La precipitación influye directamente en la lixiviación y en la escorrentía superficial y subsuperficial. Representa la mayor fuerza de conducción para el transporte de nitrógeno hasta los cursos fluviales.

La retención de nitrógeno en el suelo, debido a la desnitrificación y los procesos de sedimentación, está relacionado con el tiempo de residencia del agua, que se incrementa con la longitud de la vía de agua.

Antes de empezar con el modelo en sí, se ha tenido que verificar la relación entre el la carga total de nitratos transportados por los ríos y los parámetros escogidos para el modelo. Éstos han sido estudiados por medio del coeficiente de correlación de Pearson. En un principio, se procedió a la realización de dichos coeficientes usando conjuntamente los datos de toda la cuenca. Los coeficientes de correlación resultantes y su significancia se muestran en la tabla 3.

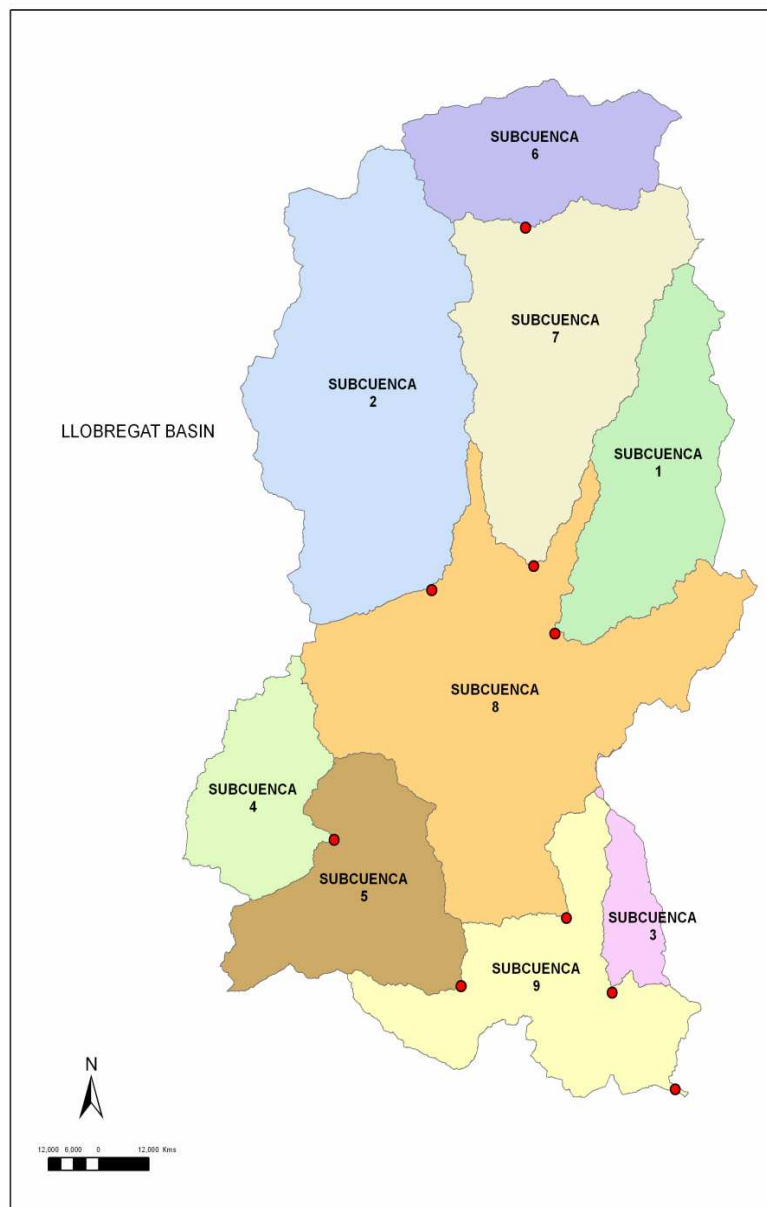
*Tabla 3: Correlaciones entre la precipitación, y la longitud del río con respecto a la cantidad de nitratos medidos*

	Precipitaciones	Longitud de río
N total	0,01	0,53

Viendo el resultado obtenido para las precipitaciones, se procedió a la verificación de la relación de los nitratos con la precipitación por subcuencas. Con ello, se vio que en casi el 50 % de las subcuencas los nitratos y las precipitaciones están totalmente relacionadas, mientras que en otras no tenían relación alguna. Por ello, y como se sabe que las precipitaciones tienen relación directa con los nitratos por medio de otros artículos y trabajos de similares finalidades, se prosiguió con las precipitaciones como parámetro del modelo.

## 4 CÁLCULOS DEL PROYECTO

### 4.1 ÁREA ESTUDIADA



*Figura 11: Subcuencas realizadas en la cuenca del río Llobregat.*

El área de estudio se compone de 9 subcuencas, mostradas en la figura 11. El número de subdivisiones ha sido establecido en base a los datos disponibles. Un resumen de sus características geográficas y climáticas se muestra en la tabla 4. Los puntos rojos de la figura 11 son los puntos en los que el río pasa de una subcuenca a otra, por lo que se puede decir que estos puntos son los finales de cada subcuenca. En esos puntos se hallan las estaciones de calidad de agua superficial de donde se han recogido los datos de

concentración de nitratos. El modelo requiere la introducción de los datos de nitratos por subcuencas, así como los datos de pluviosidad y longitud del río también por subcuencas.

En el caso de la pluviosidad, la precipitación se ha calculado por medio de los datos de las estaciones pluviométricas. Primeramente hubo que averiguar la situación de las estaciones para agruparlos por subcuencas, y a partir de ahí realizar el cálculo de la precipitación acumulada para cada subcuenca.

Para el cálculo de la longitud del río, se ha procedido a la medición de la longitud todos los cursos fluviales que se hallan en cada subcuenca.

*Tabla 4: Datos medios de las 9 subcuencas durante el periodo 2000 y 2009*

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Precipitación acumulada (mm)	Longitud del río (km)	Descarga (m <sup>3</sup> /s)
1 - Riera Gavarresa	452,32	545,34	315,9	0,45
2 - Cardaner – Suria	963,34	520,91	606,82	2,73
3 - Riera del Rubí	123,68	507,49	77,67	0,91
4 - Anoia – Jorba	284,35	444,19	104,57	0,15
5 - Anoia – Sant Sadurní d’Anoia	435,88	514,27	287,95	0,93
6 - Llobregat – Guardiola de Berguedà	352,29	610,91	205,83	3,64
7 - Llobregat – Balsareny	673,15	656,38	424,41	5,93
8 - Llobregat – Abrera	1 136,24	501,45	884,04	10,88
9 - Llobregat – Sant Joan Despí	501,61	545,13	352,64	10,12

En el caso de los fertilizantes, los datos específicos de cada subcuenca se han calculado por medio de los datos generales de fertilizantes nitrogenados usados en territorio catalán. Por medio del Instituto de Estadística de Cataluña, que mostraba la superficie cultivada por

comarcas, se ha deducido la superficie cultivada de la cuenca del Llobregat por medio de la proporcionalidad de la presencia de la cuenca en cada comarca.

Para la deposición atmosférica, el modelo EMEP daba los datos para toda la geografía española. A todo el país se le dividía en píxeles y cada píxel tenía su propio valor de deposición atmosférica. Por ello, se procedió a la identificación de los píxeles en los que se situaba la cuenca del Llobregat, hallando para cada año el valor de la deposición por medio de la media aritmética de los valores de los cuatro píxeles escogidos. Por ello, todas las subcuencas del Llobregat poseen los mismos valores de deposición atmosférica para un año concreto.

En el caso de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs), el Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) nos proporcionó los datos de descarga de nitratos por año en el periodo comprendido de este proyecto.

Por último, en el caso de las descargas industriales, ha pasado algo igual que con las EDARs ya que el ICRA nos proporcionó los datos de descarga industriales de nitratos por año.

## **4.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO**

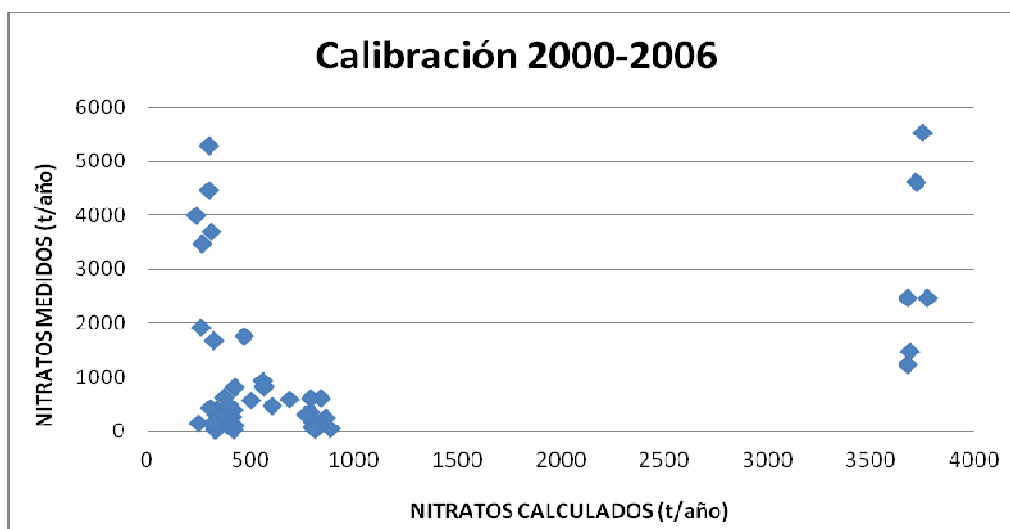
El modelo de calibración se ha realizado con los datos de los periodos 2000-2006, mientras que los datos relativos al periodo 2007-2009 se han usado para la validación del modelo.

Durante la validación los valores de los coeficientes (lluvia y longitud del río) obtenidos por la calibración se introdujeron directamente en el modelo para evaluar el rendimiento del mismo usando un nuevo conjunto de datos, como por ejemplo, un periodo distinto. La calibración de las constantes se ha realizado mediante el programa Excel, usando la herramienta Solver, minimizando la suma de los cuadrados residuales entre los puntos generados por el modelo y los datos obtenidos por medio de las estaciones de medida. Lo que se quiere conseguir es hallar los valores de las constantes y las gráficas resultantes.

En un principio, se procedió a la realización del modelo conjuntamente con las nueve subcuencas. Al hallar la gráfica, se vio que el modelo tal como se había aplicado no era factible con la cuenca del Llobregat. En la figura 12 se puede ver la gráfica resultante. En ella se pueden observar tres grupos de datos separados, teniendo dos de ellos en común una

estructura totalmente vertical. En el tercer grupo (el más cercano al punto origen de la gráfica) se agrupan la mayoría de los puntos calibrados.

Por ello, al ver que la gráfica final no era buena, se procedió a identificar el error. Por ello, se hizo el modelo subcuenca por subcuenca viendo así las subcuencas problemáticas.



*Figura 12: Calibración del modelo de las subcuencas del Llobregat*

#### **4.2.1 Calibración por subcuencas separadas**

Con las mismas fórmulas y la misma metodología para el cálculo de los parámetros alfa, se procedió a la calibración subcuenca por subcuenca para ver en cuáles el modelo no funciona, así como obtener información sobre las posibles causas por las que el modelo no genera buenos resultados.

En general, al calibrar por subcuencas individualizadas, se ha podido observar que las subcuencas problemáticas son las que se encuentran al sur y al centro de la cuenca del Llobregat. Estas subcuencas tienen en común la alta demografía, altos niveles de industrialización, así como una mayor incidencia en las captaciones de agua y construcciones de obras hidráulicas que han modificado las características hídricas y morfológicas del río.

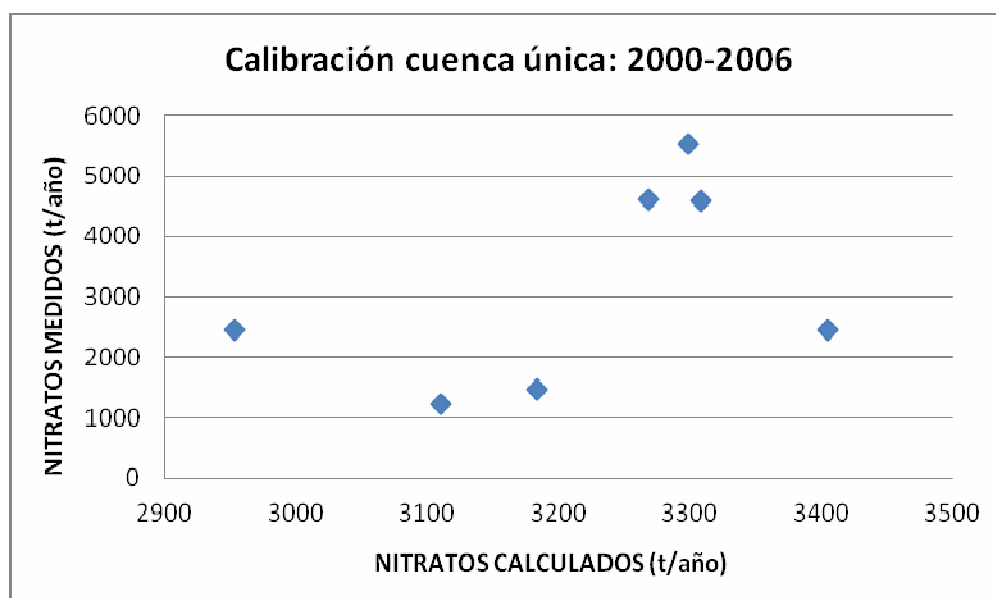
También se hicieron pruebas realizando gráficas que relacionasen la precipitación acumulada con los nitratos medidos por las estaciones de calidad superficial usados para este proyecto, ya que se sabe que estos dos parámetros tienen que tener una relación positiva. Al realizarlas, se vio de nuevo que en las subcuencas del sur y del centro no existía tal relación.

Con estos resultados, se procedió de nuevo a la verificación de los datos de entrada, así como la verificación de la distribución de los datos por las nueve subcuencas que se han establecido. Esta comprobación y verificación de los datos dio como resultado la ratificación de los datos iniciales de entrada puesto que, desde un principio, eran correctos.

#### 4.2.2 Calibración: cuenca única

Además de la calibración por subcuencas separadas, también se ha procedido a realizar el modelo considerando una única subcuenca: la total del Llobregat. Esto se hizo debido a que, pensando que a mayor escala, los errores que se sucedieron en el modelo de las subcuencas separadas serían menores y por ello se obtendrían valores más óptimos. La gráfica resultante se puede ver en la figura 13.

Los valores obtenidos para las constantes de lluvia ( $\alpha_p$ ) y longitud de río ( $\alpha_l$ ) son de 0,98 y 1,69 respectivamente. Al ver los resultados del modelo, se rechazó esta calibración y por ello este enfoque del modelo.



*Figura 13: Gráfica de la calibración del modelo para la cuenca única*

### 4.2.3 Calibración y validación con las subcuencas periféricas

Al ver los resultados anteriores, se procedió a la calibración del modelo suprimiendo las subcuencas problemáticas.

A la hora de calibrar, se ha tenido en cuenta que estudiando los resultados que se han de obtener, se ha llegado a las siguientes conclusiones o condiciones:

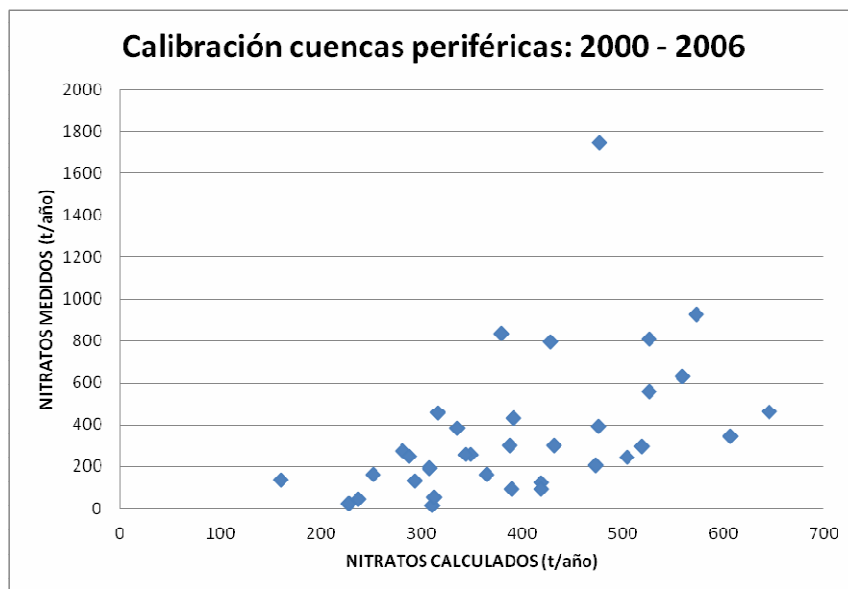
1. El parámetro coeficiente de longitud de río ( $\alpha_l$ ) tiene que ser positivo. Con ello hace que el parámetro de reducción por longitud de río ( $R_i$ ) sea menor que cero. Esto tiene que pasar, ya que las cantidades de nitratos de las fuentes aisladas tienen que descender porque en la realidad, se produce una pérdida de nitratos por los procesos mencionados en apartados anteriores.
2. El parámetro coeficiente de reducción por longitud de río ( $R_i$ ) tiene que disminuir al aumentar la longitud de río, lo que confirma el signo positivo del coeficiente de longitud de río ( $\alpha_l$ ).
3. La constante de reducción por la precipitación ( $B_i$ ) tiene que aumentar (es decir, acercarse a 1) al aumentar las precipitaciones. Esto implicaría que el coeficiente de precipitación ( $\alpha_p$ ) sería positivo al hacer la normalización de forma recíproca con respecto a la longitud de río.

Primeramente se ha realizado la calibración con ocho de las nueve subcuencas (se suprimió la subcuenca 9), dando unas gráficas aceptables. Pero no se cumplen las tres condiciones necesarias. Aunque la gráfica sea satisfactoria (los nitratos medidos y calculados tienen una relación positiva), el valor del coeficiente de río tiene el signo opuesto a como debiera ser, mencionando también que el modelo, de esta forma, da buenos resultados. Los valores obtenidos para las constantes de lluvia ( $\alpha_p$ ) y longitud de río ( $\alpha_l$ ) son de 6,06 y -0,62 respectivamente.

Más tarde se procedió a la realización de la calibración con siete y seis subcuencas. El mismo problema seguía persistiendo, aunque el valor del coeficiente de río iba cada vez más acercándose a 0. Finalmente, se realizó la calibración con cinco subcuencas: Riera Gabarresa (1), Cardener-Suria (2), Anoia-Jorba (4), Llobregat-Guardiola de Bergueda (6) y Llobregat-Balsareny (7). En esta calibración, los valores obtenidos para las constantes de lluvia ( $\alpha_p$ ) y longitud de río ( $\alpha_l$ ) son de 1,40 y 0,94 respectivamente.

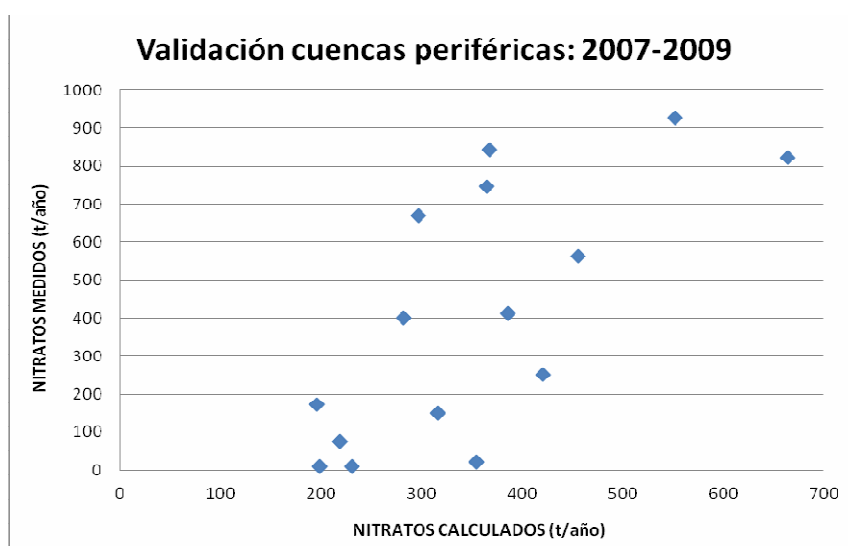


Con todos los datos de los nitratos aportados por las fuentes difusas y fuentes aisladas, la precipitación y longitud del río de las cuencas seleccionadas, el modelo calcula unos datos de cantidad de nitratos en t/año. La calibración se muestra en la figura 14.



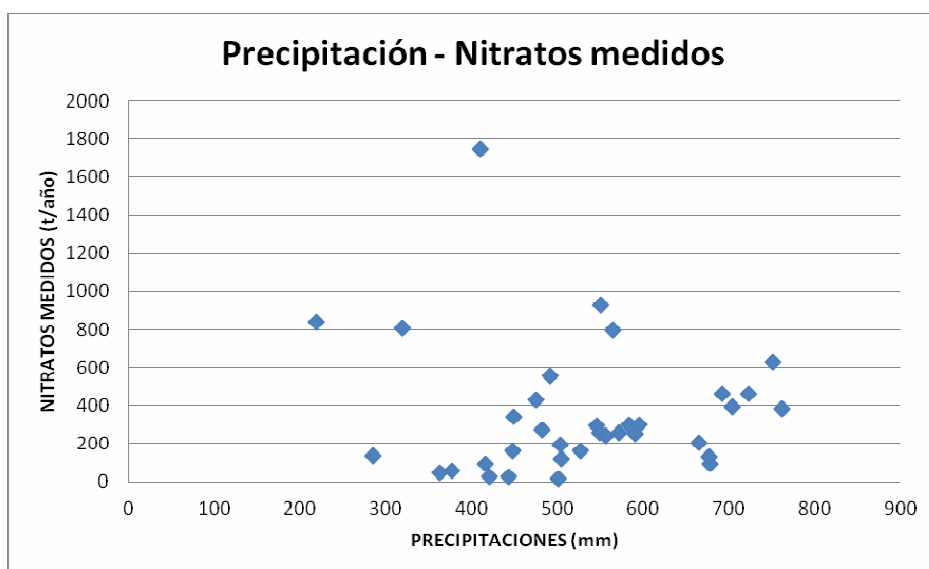
*Figura 14: Gráfica de la calibración con las cinco subcuencas seleccionadas*

Como ya se ha mencionado en anteriores apartados, la calibración se ha realizado con los datos pertenecientes desde el 2000 hasta el 2006, mientras que la validación con los datos del 2007 al 2009. Los resultados de la validación muestran una relación positiva entre los datos calculados y medidos, con lo que en estas subcuencas tanto el modelo como los resultados que éste aporte son viables. El resultado se muestra en la figura 15.

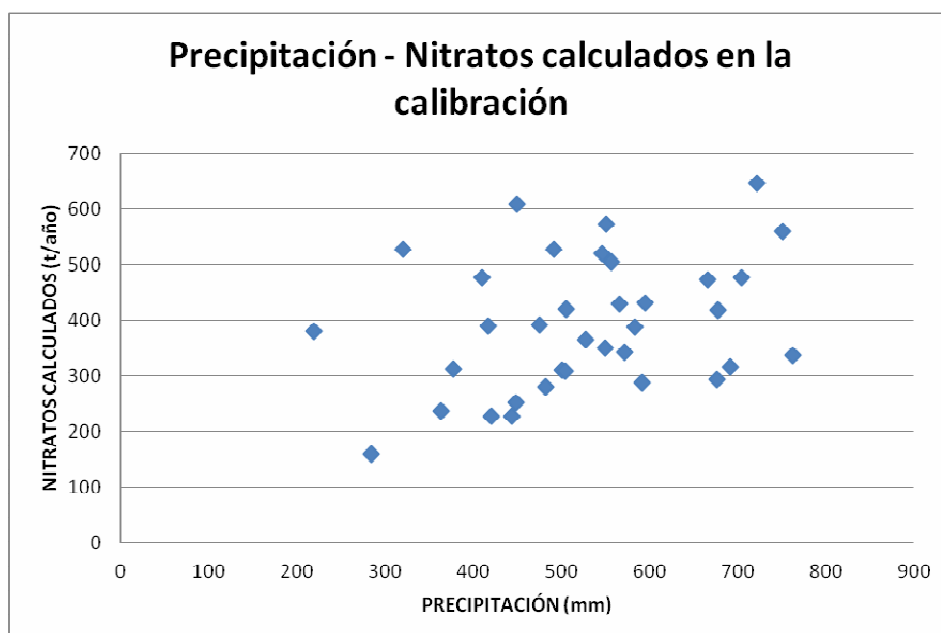


*Figura 15: Gráfica de la validación con las cinco subcuencas seleccionadas*

La figura 16 muestra la relación de la precipitación con la cantidad de nitratos medidos en las subcuencas correspondientes en el periodo 2000 a 2006. La figura 17, muestra esto mismo pero con la cantidad de nitratos calculados por el modelo. Tanto con los nitratos medidos y calculados, se observa la existencia de relación positiva con la precipitación. Esto mismo ocurre también con las gráficas en el periodo de la validación.



*Figura 16: Gráfica de la relación entre la precipitación y los nitratos medidos*



*Figura 17: Gráfica de la relación entre la precipitación y los nitratos calculados por el modelo*

#### 4.2.4 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

La certeza entre las medidas y las predicciones de modelo se ha estudiado por medio del coeficiente de Nash-Sutcliffe. Este coeficiente muestra el acuerdo entre los valores medidos y predichos por el modelo. Los valores que puede tomar este coeficiente varían entre 1 y  $-\infty$ . Cuando el valor es positivo, significa que la relación entre los valores medidos y predichos es satisfactoria, mientras que si el valor del coeficiente es negativo, no hay relación entre los datos calculados por el modelo y los datos medidos. El coeficiente  $\epsilon$  de Nash – Sutcliffe se expresa como:

$$\epsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2}$$

Donde  $O_i$  y  $P_i$  corresponden respectivamente a la medición y a la predicción de la subcuenca  $i$ , y  $O$  es la media de las mediciones.

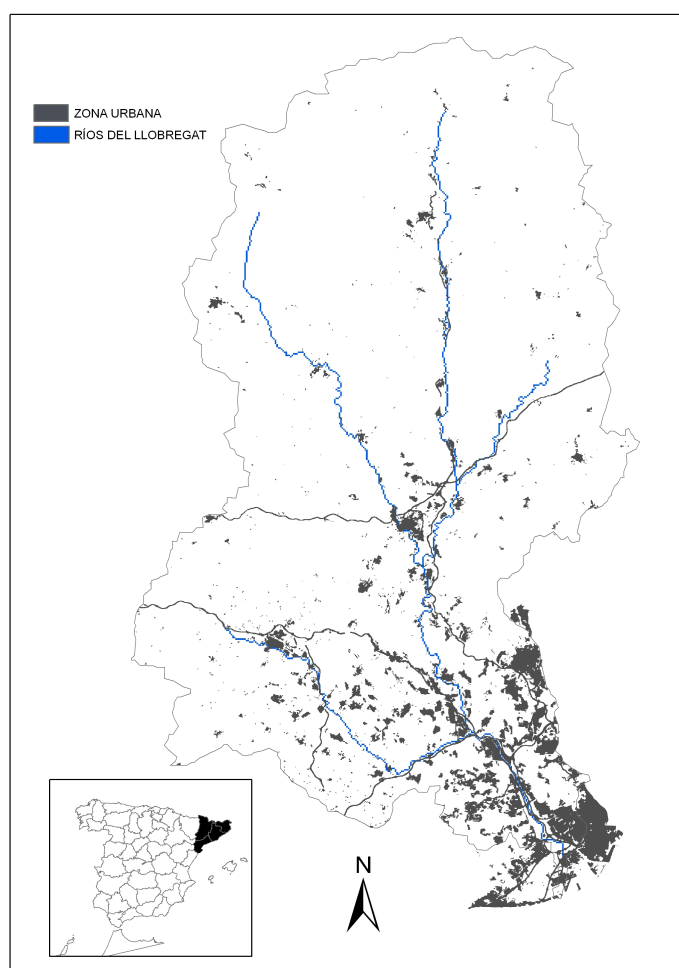
Para el caso de las la calibración de las dos subcuencas del Llobregat, las predicciones del modelo poseen una buena certeza con los valores medidos, tanto en la calibración como en la validación. Los coeficientes de Nash-Sutcliffe resultantes son 0,21 para la calibración y 0,38 para la validación.

### 4.3 ANÁLISIS DE LA PRESIÓN DE NITRÓGENO

La aplicación del modelo ha expresado que la presión de nitrógeno está fundamentalmente influenciada por las emisiones difusas. Por diversos factores mencionados anteriormente, en las subcuencas del sur, las más densamente pobladas, no ha sido posible la realización del modelo, con lo que los datos que se mencionan en los siguientes apartados corresponden a las cinco subcuencas en las que sí se ha podido realizar el proyecto. La figura 18 muestra las áreas urbanas de la cuenca del Llobregat, observándose la gran densidad de población que hay en el sur.

Los resultados muestran que las fuentes aisladas tienen menos relevancia que las fuentes difusas, pero dependiendo de la subcuenca, esta puede ser más o menos importante.

Una vez calibrado, el modelo estima la retención de nitrógeno y de acuerdo con las diferentes partes, permite la evaluación de la presión de nitrógeno en la calidad de las corrientes de agua.



*Figura 18: Áreas urbanas de la cuenca del Llobregat*

#### 4.3.1 Fuentes difusas

Uno de los primeros objetivos del desarrollo del modelo fue la posibilidad de identificar las áreas sujetas a una mayor presión de nitrógeno, y la consecuente estimación de la cantidad de nitrógeno localmente descargada en los ríos. Los cambios en la presión de nitrógeno procedente de las fuentes difusas no sólo están influenciados por la entrada de nitrógeno, también están condicionadas por las condiciones meteorológicas.

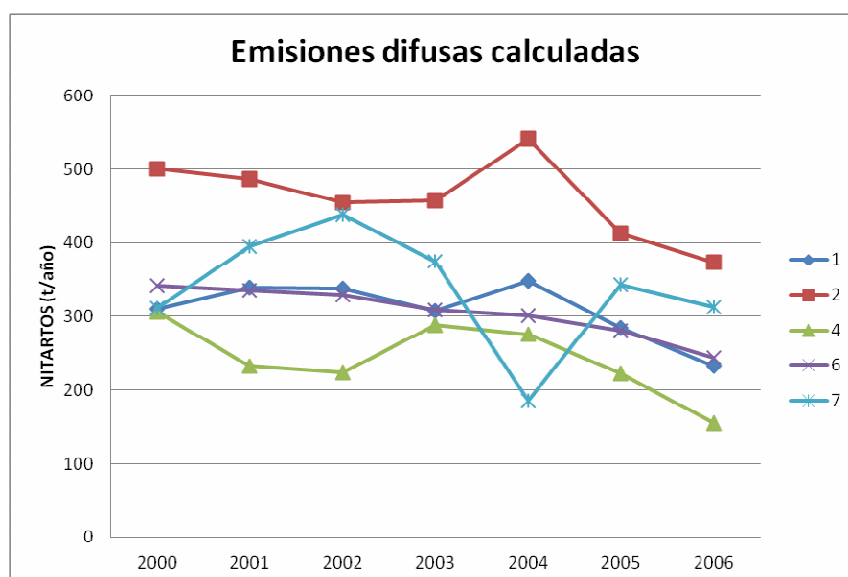
La media de pérdida de nitrógeno debidas a las fuentes difusas en el periodo 2000 a 2006 en toda la cuenca es de 17,79 kg/ha. Más detallado, por subcuencas, se puede ver que la mayor cantidad se da en las subcuenca de Cardener - Suria, siendo en las otras cuatro subcuencas una cifra similar. Los datos de emisiones difusas de nitrógeno calculadas en las subcuencas del Llobregat se muestran en la tabla 5.

*Tabla 5: Emisiones difusas de nitrógeno en toneladas calculadas por el modelo.*

<b>Subcuenca</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>MEDIA</b>
<i>Riera Gavarresa</i>	309,70	338,79	338,32	307,87	348,41	285,01	232,26	<b>308,62</b>
<i>Cardener – Suria</i>	500,86	486,70	455,31	457,51	541,20	413,36	373,47	<b>461,20</b>
<i>Anoia – Jorba</i>	305,83	233,00	223,41	288,79	276,47	222,60	155,42	<b>243,64</b>
<i>Llobregat – Sant Salvador de Guardiola</i>	342,15	336,05	328,63	308,95	301,13	280,34	244,27	<b>305,93</b>
<i>Llobregat - Balsareny</i>	311,46	395,37	437,72	375,25	185,67	343,32	312,48	<b>337,32</b>

Este resultado era de esperar por dos motivos fundamentalmente: la extensión de zonas de cultivo es mayor en la subcuenca de Cardener – Suria y también las tasas de deposición atmosférica son de las más altas.

Como se puede ver en la figura 19, en general se han predicho grandes cantidades de pérdidas para el año 2001 al 2003, los años más húmedos, mientras que se han calculado las pérdidas más bajas de nitratos para el año 2006, el año más seco. Los datos de máximos, mínimos y cambios de tendencia de las fuentes difusas están en consonancia con aumentos y descensos en las precipitaciones.



*Figura 19: Emisiones difusas calculadas para el periodo 2000 a 2006*

También se ha analizado la relación de la cantidad de fertilizantes nitrogenados usados con los resultados del modelo. Los años con mayores cantidades de fertilizantes usadas en la cuenca del Llobregat fueron los años 2000 y 2001, no coincidiendo con las mayores concentraciones predichas por el modelo de nitratos en los ríos. Aunque sí guardan relación en cuanto a los años finales del periodo de estudio puesto que la cantidad de nitratos usados en la agricultura en el Llobregat ha ido descendiendo desde el 2004 en relación a los primeros años de estudio.

Con respecto a las tasas de deposición atmosférica, los datos del modelo no reflejan el aumento, aunque mínimo, de la deposición atmosférica a partir del 2004.

Las pérdidas de nitrógeno desde el terreno hacia las aguas están estrechamente relacionadas con las precipitaciones que se producen en la zona, aumentando la lixiviación del nitrógeno, aunque también hay que tener en cuenta la cantidad de fertilizante que se aplica. Los resultados del modelo muestran las razones del comportamiento de las presiones de los nitratos y sus cambios. La cantidad de nitratos que se introducen en el terreno marca el resultado y el valor que se va a obtener, pero el comportamiento (es decir, aumento y disminución de la tendencia de nitratos a lo largo de los años) viene marcado por las precipitaciones.

En resumen, la cantidad de nitratos que se introducen es un factor muy importante en las emisiones difusas, pero el factor determinante es la precipitación que se produzca en la cuenca.

Esto se demuestra con el comportamiento de dos subcuencas: las subcuencas 1 y 7. Como se puede ver en los datos aportados, son de las dos subcuencas que más cantidad de presión de nitratos aportan en cuanto a emisiones difusas. Los valores de nitratos introducidos al terreno, en todos los años del periodo 2000 a 2006, han sido mayores en la subcuenca 7 que en la 1. Pero en algunos años las emisiones difusas de nitratos en la subcuenca 1 han sido mayores que en la subcuenca 7. Esto se ha debido a que las precipitaciones en la subcuenca 7 han sido escasas y por lo tanto, la cantidad de nitratos que ha alcanzado algún curso fluvial ha descendido, traduciéndose en una menor cantidad de fuentes difusas. Por ello, aunque hay mayor aporte de fertilizantes nitrogenados y de deposición atmosférica en la subcuenca 7 que en la 1, por efecto de las precipitaciones,

este hecho no se refleja. De ahí que se diga que la cantidad de nitratos aportados sea importante pero que el carácter fundamental de este modelo sean las precipitaciones y que sean de gran importancia en el comportamiento a lo largo del tiempo.

#### 4.3.2 Distribución de las fuentes

Una vez calibrado el modelo, éste permite la estimación de la contribución relativa de cada fuente de nitrógeno considerando las diferentes vías de transferencia de nitrógeno y de las fuentes que las produjeron. La comparación entre el reparto de las fuentes de entrada de nitrógeno y la contribución final de cada uno de ella, de acuerdo con las predicciones del modelo, permite entender el comportamiento de la cuenca y permite identificar las fuentes que afectan más a la calidad del agua. Comprender los factores que tienen un impacto en la calidad del agua es esencial para proporcionar programas efectivos para evitar la contaminación.

En la tabla 6 se comparan el porcentaje de entrada de nitratos por parte de las distintas fuentes a las subcuencas, mientras que en la tabla 7, se puede observar los porcentajes de nitratos aportados a las aguas, es decir, que podremos ver la influencia en la presión por nitratos según las fuentes que se consideran.

*Tabla 6: Distribución en porcentaje de los distintos tipos de fuente.*

<i>Subcuenca</i>	<b>Fertilizantes nitrogenados</b>	<b>Deposición atmosférica</b>	<b>Fuentes aisladas</b>
<i>Riera Gavarresa</i>	48,74	38,75	12,51
<i>Cardener – Suria</i>	54,35	43,3	2,35
<i>Anoia – Jorba</i>	55,1	43,9	1
<i>Llobregat – Sant Salvador de Guardiola</i>	54,86	43,71	1,43
<i>Llobregat - Balsareny</i>	53,09	42,28	4,63

*Tabla 7: Reparto en porcentaje de la presión de nitratos.*

<i>Subcuenca</i>	<b>Fertilizantes nitrogenados</b>	<b>Deposición atmosférica</b>	<b>Fuentes aisladas</b>
<i>Riera Gavarresa</i>	44,11	34,99	20,90
<i>Cardener – Suria</i>	53,51	42,61	3,88
<i>Anoia – Jorba</i>	54,51	43,42	2,07
<i>Llobregat – Sant Salvador de Guardiola</i>	54,31	43,27	2,42
<i>Llobregat - Balsareny</i>	50,19	40,07	9,74

Como podemos observar, tanto en la entrada de nitratos como en la presión de los nitratos, la principal causa mayor de contaminación de los ríos en la cuenca del Llobregat son los nitratos procedentes de la agricultura.

En los porcentajes que representan las fuentes difusas (fertilizantes nitrogenados y deposición atmosférica), se observa un leve descenso entre los valores de entrada de nitratos y la presión que ejercen en el río en todas las subcuencas.

Por otro lado, hay un aumento notable entre los porcentajes de entrada y los porcentajes de presión de nitratos de las fuentes aisladas en las cinco subcuencas. El mayor incremento se ha producido en la Riera Gavarresa, llegando a ser las fuentes aisladas un tipo de fuente a tener en cuenta. Aunque en las restantes el porcentaje es menor, la diferencia entre los porcentajes de entrada y los de presión se han incrementado en más de un 50%, llegando incluso, a superar el incremento del 100%

#### **4.4 ESCENARIOS DE ENTRADA DE NITRÓGENO**

Este proyecto tiene una gran aplicación en el mundo de la administración y gestión de los nitratos. Con él, se puede observar qué es lo que va a ocurrir y ver las actuaciones que se pueden llevar a cabo.



Por ello, en este apartado se va a proceder al estudio de los posibles escenarios futuros variando las cantidades de nitratos que se introducen en la cuenca del Llobregat. Esto permite observar y estudiar el funcionamiento de los distintos procesos que afectan a la presión de los nitratos, permitiendo comparar y ver la influencia de las distintas fuentes de nitratos.

**Caso 1: aumento de un 20% de las fuentes difusas y disminución del 20% de las fuentes aisladas**

En este caso, en todas las subcuencas y en todos los años, la cantidad de nitratos en los cursos fluviales es mayor al tener más influencia las fuentes difusas sobre las aisladas. El aumento de la presión de los nitratos a lo largo del curso fluvial es de entre un 16% y 18%.

En cuanto a la presión de los nitratos, se puede observar el hecho de que a un mayor aumento de las fuentes difusas (se ha aumentado un 20% tanto los fertilizantes como la deposición atmosférica), mayor es la influencia de este tipo de fuentes. Pero hay que observar que la mayor subida de la presión de nitratos se ha producido en la presión ejercida por la deposición atmosférica. Los porcentajes de la presión de nitratos en este nuevo caso, así como la variación en el porcentaje con respecto a los valores previos (sin aumento) se muestran en la tabla 8

*Tabla 8: Resultados en porcentaje del caso 1*

<i>Subcuenca</i>	<b>Fertilizantes nitrogenados</b>	<b>Deposición atmosférica</b>	<b>Fuentes aisladas</b>
<i>Riera Gavarresa</i>	47,38 (+ 7,41%)	37,63 (+ 7,55%)	14,99 (-28,29%)
<i>Cardener – Suria</i>	54,21 (+ 1,30%)	43,18 (+ 1,34%)	2,61 (-32,73%)
<i>Anoia – Jorba</i>	54,88 (+ 0,68%)	43,72 (+ 0,70%)	1,39 (-32,97%)
<i>Llobregat – Sant Salvador de Guardiola</i>	54,75 (+ 0,81%)	43,62 (+ 0,82%)	1,62 (-33,02%)
<i>Llobregat - Balsareny</i>	51,87 (+ 3,35%)	41,39 (+ 3,30%)	6,73 (-30,89%)

### **Caso 2: disminución de un 20% de las fuentes difusas y aumento del 20% de las fuentes aisladas**

En este segundo caso, por el contrario, ha habido una disminución de la presión de los nitratos. Esto se debe fundamentalmente a que una disminución de la entrada de nitratos por parte de las fuentes difusas, implica una reducción muy alta en cuanto a cantidad global. Esta reducción ha sido de aproximadamente un 17%

La presión de los nitratos debido a las fuentes difusas ha descendido, pero siguen siendo los principales aportadores de nitratos, y con ello, las principales fuentes de presión de los nitratos. Esto también se debe a que el descenso ha sido leve para este tipo de fuentes.

En cuanto a las fuentes difusas, han aumentado, de manera significativa en la subcuencas de Riera Gavarresa y Llobregat – Balsareny. En las restantes, el incremento porcentual también ha sido bastante importante (llegando a tener las tasas más altas de incremento), pero al no influenciar mucho en la presión, en la práctica este aumento se puede considerar no significativo. La variación en el porcentaje de la presión de los nitratos con respecto a los valores previos (sin aumento) en este caso 2, se muestra en la tabla 9.

*Tabla 9: Resultados (en porcentaje) del caso 2*

<i>Subcuenca</i>	<b>Fertilizantes nitrogenados</b>	<b>Deposición atmosférica</b>	<b>Fuentes aisladas</b>
<i>Riera Gavarresa</i>	39,99 (-9,34%)	31,66 (-9,5%)	28,34 (35,63%)
<i>Cardener – Suria</i>	52,51 (-1,85%)	41,80 (-1,9%)	5,68 (46,51%)
<i>Anoia – Jorba</i>	53,96 (-1,00%)	42,97 (-1,03%)	3,06 (48,10%)
<i>Llobregat – Sant Salvador de Guardiola</i>	53,67 (-1,16%)	42,75 (-1,20%)	3,57 (47,65%)
<i>Llobregat - Balsareny</i>	47,86 (-4,63%)	38,24 (-4,56%)	13,89 (42,67%)

## 4.5 LOS NITRATOS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio global y el cambio climático son problemas que han trascendido el ámbito de la investigación científica para llegar y afianzarse en el tejido de la sociedad. Éstos son realidades instaladas definitivamente entre nosotros, no ya como problemas del futuro, como se han percibido hasta hace poco, sino como una realidad a la cual nos hemos de adaptar y un desafío al que hemos de responder.

El cambio global se notará en España en mayor medida que en resto de Europa. Según varios estudios realizados por el Proyecto Prudence [13], de manera global se pueden establecer las siguientes variaciones en el Mediterráneo Occidental para el periodo 2070-2100:

- Reducción global de la pluviometría entre un 0 y un 10 %.
- Aumento de la temperatura media anual de 2 a 6 C°.
- Aumento de la variabilidad intraanual de las lluvias y de las temperaturas (incremento de la desviación estándar). En la pluviometría, la variabilidad significa que se incrementan los episodios tormentosos, aunque en la media llueva menos. En la temperatura, la variabilidad significa que el incremento de T no es uniforme, sino que es mayor en verano que en invierno.

Las precipitaciones son muy importantes en cuanto a la movilidad de los nitratos, por lo cual necesitamos saber cuáles serán las precipitaciones en un futuro. Además del Proyecto Prudence, también hay otros estudios en los que se estima que la reducción de las precipitaciones pueden llegar incluso a descender un 15% con respecto a la media. [14]

El cambio climático es un hecho y es un fenómeno que tenemos que tener en cuenta. Por ello, y para ver qué puede suceder en épocas futuras con los nitratos, en este proyecto y gracias al modelo desarrollado, se va a calcular la cantidad de nitratos que pueden llegar a los distintos cursos fluviales con las precipitaciones esperadas a causa del cambio climático.

Con este modelo, se ha podido llegar a la conclusión de que con los mismos niveles de nitratos que son introducidos por las distintas fuentes, con menor precipitación, hay menores presiones de nitratos. Esto se produce ya que al haber menor precipitación, hay menor movilidad de nitratos procedentes de las fuentes difusas, principal problema en la cuenca del Llobregat.

En general, se produce un descenso de un 3,24% en la presión de nitratos. Este escenario es el más propicio pero no el único. El cambio climático posee una característica: épocas de grandes sequías y épocas en las que la pluviosidad es mayor de lo normal. A la hora de hacer este apartado, con los mismos datos, se introdujo una pluviosidad bastante baja de lo normal. Esto produjo que aunque las precipitaciones sean bajas, al ser tan baja la mínima (en la normalización de las precipitaciones se tiene en cuenta el mínimo, no el máximo), el coeficiente de reducción de lluvia sea alto, cercano a la unidad, dando una presión mayor que la actual incluso con una menor pluviosidad.

## 5 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha creado un modelo que representa la pérdida de nitrógeno en parte de la cuenca del río Llobregat en el periodo 2000 a 2006. Aunque eran nueve subcuencas al comienzo, sólo se ha podido usar en cinco. El motivo de que cuatro subcuencas no estén dentro del estudio es debido a que la calibración del modelo con esas subcuencas era inviable, ya que los resultados que se obtenían eran físicamente imposibles.

El resultado de la calibración con las ocho subcuencas producía un valor negativo en coeficiente longitud de río ( $\alpha$ ). Este hecho produce que a la hora de aplicar el modelo y, sobre todo, a la hora de analizar los distintos escenarios evaluados en apartados anteriores, diera como resultado que las fuentes aisladas aumentaban a lo largo del cauce del río ya que, el coeficiente de reducción de longitud de río era mayor de 1.

Este mismo hecho ha pasado evaluando el modelo con siete y seis subcuencas. Ya con cinco subcuencas, los valores de los dos coeficientes daban positivos, siendo los coeficientes de reducción menores de 1 y mayores de 0.

Los motivos por los que esto ha sucedido no se saben exactamente ya que en este proyecto no se han podido confirmar. Pero sí que se han redactado hipótesis de algunos errores, pudiendo ser sólo uno de ellos o varios a la vez:

- El error en la toma de datos es el primer y, según los hechos que se han desarrollado a lo largo de este proyecto, el más probable fallo de este modelo. El motivo de que se haya pensado en esta posibilidad es en la inexactitud en la precisión de algunos datos ofertados por las instituciones oficiales de los que dependen dichos datos. Pero al evaluar los fallos al realizar el modelo, y sobre todo, al realizar las calibraciones por subcuencas separadas, se ha podido ver que las subcuencas en las que se producían los fallos más importantes, y por ello, el fallo de la calibración, eran las subcuencas del sur, cuyo denominador común es la alta densidad poblacional. Por ello, se decidió buscar otras hipótesis que pudieran dar lugar a que estos errores sólo se produjesen en las subcuencas del sur y del centro, y no en las periféricas, las subcuencas donde menor es la densidad de población.
- En el río Llobregat se producen obras de captación de agua para el consumo humano. Actualmente constituye el 65% de la demanda de agua del río Llobregat (es uno de los principales recursos de agua de consumo de todo el área metropolitana de Barcelona).

Otra actividad importante es el uso industrial, que usa el 25 % del agua del Llobregat. [15]. Esta agua, luego es devuelta al río por medio de las estaciones depuradoras de aguas residuales. Esto puede dar lugar a una modificación de los datos naturales de nitratos.

- Aumento considerable en estas zonas del número de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARs) y de la industria en estas zonas debido a una alta densidad de población. Con esto, hay mayor probabilidad de posibles incidencias no mostradas en los datos, como, por ejemplo, empleo de las aguas depuradas para el riego de zonas agrícolas.
- El Llobregat es uno de los ríos más importantes en Cataluña, dependiendo de él muchas zonas naturales. Por ello, se han producido obras hidráulicas que afectan al caudal. En este río, además, parte del agua de la desembocadura se bombea aguas arriba para aumentar el caudal natural, recargar los humedales del delta y controlar la intrusión marina. (tanto de captación como retorno de agua en diversos puntos de la cuenca) [16]. Fundamentalmente se da en el curso bajo del Llobregat. Esto puede producir que se contabilice varias veces la misma cantidad de nitratos.
- Al haber grandes ciudades a lo largo de su cauce, se han producido modificaciones del trazado natural del cauce de los ríos. Esto se ha realizado a lo largo del río Llobregat, acentuándose mucho más en el curso inferior del río debido a la alta densidad poblacional de la zona. Un claro ejemplo es la modificación del curso fluvial en la desembocadura del Llobregat por la ampliación del puerto de Barcelona. Esto ha ocasionado un aumento de la longitud del río, lo que ocasiona que el agua recorra mayores longitudes. También al modificar el trazado se modifica la morfología del cauce, pudiendo interferir con los nitratos en parámetros de sedimentación, por ejemplo.

Todas estas razones pueden influir en los datos usados en este proceso, inclusive alguna otra razón que no se haya incluido. Pero al no disponer de otros datos, no se ha podido corroborar las hipótesis que se acaban de exponer.

Ya en cuanto a los resultados del modelo, a partir del desarrollo del mismo, podemos observar que el problema de los nitratos en la cuenca del Llobregat se debe en gran medida a las fuentes difusas. Los fertilizantes nitrogenados en mayor medida, y la deposición

atmosférica en menor medida, producen más del 80% de media de la presión ejercida por los nitratos, y a día de hoy, corresponden a más de un 90% de media de tipo de fuente de nitratos.

Con ello no hay que olvidarse de la importancia de las fuentes aisladas. Aunque sólo en una subcuenca este tipo de fuente supera el 10% de contribución de nitratos, con el modelo se puede observar que es el único tipo de fuente en que es mayor el porcentaje de presión de nitratos que el porcentaje de su contribución. Esto hay que tenerlo muy en cuenta puesto que, si este porcentaje crece, la presión que puede ejercer se incrementará en mayor medida.

La modelización estocástica de la cuenca del Llobregat ha permitido el estudio de distintos escenarios posibles. Esto es muy bueno de cara a una administración, gestión y planificación de medidas contra la contaminación de nitratos por medio de las administraciones pertinentes. Con la evaluación de dos escenarios posibles, se ha deducido que para una mayor eficacia en contra de la proliferación de nitratos en los cursos fluviales, se tiene que actuar tanto en las fuentes difusas como en las aisladas. Esto se debe a que una disminución de un 20% en las fuentes difusas de nitratos, hace descender un porcentaje menor del 10%. En cambio, un descenso del 20% en las fuentes aisladas hace que la presión de los nitratos descienda en más de un 30% de media entre las cinco subcuencas. Por estos dos datos se deduce que hay que actuar en las dos fuentes, ya que el descenso en la presión de las fuentes difusas, aunque sólo sea de un 10%, equivaldría a una gran cantidad de nitratos (en toneladas) que no llegaría a los cursos fluviales. En cambio, las fuentes aisladas, con un pequeño recorte, se produce un efecto mayor de lo esperado, siendo esto un aliciente para el control de este tipo de fuentes, ya que es más fácil y sencillo.

El desarrollo de este modelo, además de para administrar y gestionar la cuenca, también nos permite mirar al futuro y poder predecir qué es lo que va a suceder debido a los cambios en el clima que pueden y van a suceder. Como ya se ha visto anteriormente, el cambio climático traerá un descenso en la presión de los nitratos. Aunque no hay que confiarse puesto que un escenario excesivamente seco, puede acarrear una subida de la presión de nitratos.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PLANA CASTELLVÍ, Josep A.: “Una aportación al estudio hidrológico del Llobregat”.
- [2] DUARTE, Carlos M et al. (2006) CSIC: “Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra”.
- [3] CICEANA (Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América): “Ciclo del nitrógeno”.
- [4] IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2007): “Ahorro, Eficiencia energética y fertilización nitrogenada”.
- [5] ZAGAL, Erick: “El Ciclo del Nitrógeno en el suelo”. Universidad de Concepción.
- [6] ACA (Agència Catalana de l'aigua): “Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Catalunya”. Anexo X: Resultados de las presiones evaluadas en las masas de agua de la demarcación.
- [7] ACA (Agència Catalana de l'aigua) (2008): “El agua en Cataluña”.
- [8] ACA (Agència Catalana de l'aigua) (2003): “Programa de sanejament d'aigües residuals industrials”.
- [9] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- [10] Directiva del consejo de 12 de diciembre de 1991 relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.
- [11] GRIZZETTI B. et al. (2004): “Modelling nitrogen pressure in the Odense Riber Basin”.
- [12] GRIZZETTI B. et al (2004): “A statistical method for source apportionment of riverine nitrogen loads”
- [13] ORTUÑO GOBERN, Felip (2010): “Cambio climático y agua subterránea”.



- [14] Proyecto ACCUA (2011) “Adaptacions al Canvi Climàtic en l’Ús de l’Aigua”.
- [15] TERRADO, Marta et al. (2011) “Impact of climatic extremes on hydrological ecosystems services in a heavily humanized Mediterranean basin”.
- [16] SCARCE, (2012) “Evaluación y predicción de los efectos del cambio climático en la cantidad y la calidad del agua en ríos ibéricos (2009-2014)”.

MODELIZACIÓN ESTOCÁSTICA DE LA PRESIÓN DE  
LOS NITRATOS EN LA CUENCA DEL RÍO  
LLOBREGAT

DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO

# 1 COSTES DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Un estudio económico tiene como finalidad determinar la variabilidad del proyecto, para el cual se hace un balance de ingresos y gastos, determinando la rentabilidad del proyecto.

Al tratarse de un proyecto de investigación y aplicación científica, el estudio económico se centrará en la valoración de los gastos derivados de la realización del proyecto. De acuerdo con las características del mismo, estos gastos pueden considerarse clasificados en los siguientes conceptos: relativos a los recursos humanos, a los equipos utilizados y gastos.

## 1.1 COSTE DE PERSONAL

El personal requerido para la realización del presente proyecto lo compondrán:

- Ingeniero superior junior: será el responsable del proyecto, el cual deberá acotar el alcance y los objetivos del mismo, teniendo conocimientos en modelización y del software que se utilizará en el proyecto, teniendo que interpretar los resultados obtenidos en el estudio.
- Ingeniero superior senior: será el encargado de dirigir el proyecto.

En este apartado no se ha tenido en cuenta personal administrativo. Los gastos en los recursos humanos aparecen reflejados en la tabla 10.

Se ha considerado que el precio por hora del ingeniero director del proyecto es de 70 €/h, mientras que para el ingeniero junior es de 20 €/h, teniendo en cuenta que el segundo no dispone de experiencia en el desarrollo de proyectos.

*Tabla 10: Costes de personal*

<i>Concepto</i>	<i>Precio (€/h)</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Coste (€)</i>
Ingeniero superior junior	20	960	19 200
Ingeniero superior senior	70	50	3 500
<b><i>SUBTOTAL</i></b>			<b>22 700</b>

## 1.2 COSTE DE RECURSOS MATERIALES

### 1.2.1 Material informático

En este apartado se incluye tanto el material informático en sí utilizado, como las licencias correspondientes del software empleado.

El material informático requerido ha sido un ordenador personal, una máquina de impresión y el software propio del sistema informático utilizado como del específico para la realización de los mapas.

Destacan: el sistema operativo Windows XP, el paquete de programas Microsoft office 2007.

En total, el coste en material informático asciende a 1 590 €.

### 1.2.2 Gastos varios

En este apartado se incluye el resto de costes que se originaron en la elaboración del proyecto. Constituidos esencialmente por el material de oficina que ha sido necesario. Estos gastos se estiman en unos 120 €.

Finalmente, recapitulando los precios subtotales originados por los recursos materiales, el subtotal debido a los materiales necesarios para la elaboración del proyecto aparece en la tabla 11.

*Tabla 11: Costes de los recursos materiales*

<i>Concepto</i>	<i>Coste (€)</i>
Material informático	1 590
Gastos varios	120
<b><i>SUBTOTAL</i></b>	<b>1 710</b>

### 1.3 COSTE GLOBAL

Sumando todos los costes parciales relatados en los apartados anteriores, podemos concluir el coste global del proyecto, el cual se muestra en la tabla 12.

*Tabla 12: Coste total de este proyecto.*

<i>Concepto</i>	<i>Coste (€)</i>
Coste de personal	22 700
Costes de recursos materiales	1 710
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>24 410</b>

Por tanto, el coste total de este proyecto asciende a 24 410 €.